MODELADO EN INGENIERIA

Autor:

Dr. Ing. Johny Molleja

INDICE

PROLOGO

La tradición artesana de la ingeniería la ha llevado a basar sus diseños, apoyándose en modelos de primera o segunda aproximación, pues no es fácil sacar los artefactos de la mente y plasmarlos en el mundo real y que funcionen como se quiere. Los modelos ayudan a ensayar materiales y los comportamientos, de manera de no gastar los materiales definitivos, que regularmente son costosos y difíciles de conseguir.

Durante los milenios que la ingeniería ha realizado sus actividades, se han generado documentos e informes donde aparecen las descripciones sobre la realización de sus modelos, pero la actividad ingenieril ha superado su etapa artesanal y se ha convertido en una ciencia, con su epistemología, fundamentada en la Filosofía de la Tecnología, aportando conocimiento y explicaciones de los fenómenos científicos y tecnológicos, esto somete al ingeniero a una reflexión ontológica y teleológica de sus actividades, profundizando en los diseños y en la realización de los modelos.

Este documento es la compilación de los trabajos de 8 investigadores que aportan un enfoque filosófico a la realización de modelos en ingeniería en los temas matemáticos, mediciones, similitudes, escalado de los modelos, los aportes epistemológicos de los modelos, modelos resultantes de la interacción con otras disciplinas y de su funcionalidad en el diseño. Cada tema es vasto, es por eso que este documento solo recoge los aportes descritos para poder organizar la actividad de modelaje en la formación de los ingenieros, sobre todo en la etapa de maestría y doctorado.

La ingeniería es una profesión estratégica en la sociedad, ya que con ella, la sociedad encuentra soluciones a los problemas de tipo técnico, la fabricación de artefactos y sistemas que hacen la vida de los individuos más cómoda, además de favorecer las relaciones de intercambio con otras sociedades que, por alguna razón, no genera los artefactos que genera la sociedad A, se intercambian con los artefactos de la sociedad B que no se generan en A.

La reflexión sobre la actividad ingenieril es más importante en nuestros días, ya que el planeta se hace más pequeño y hay que evaluar con precisión la contaminación que producen los procesos industriales, además de la seria consideración de ir a sitios fuera del planeta, aspecto que parece muy a largo plazo, pero que los trabajos e investigaciones tecnológicas que hagamos al respecto, acortarán la llegada a esa situación

Dr. Ing. J. Molleja

Profesor UCV

CAPITULO I

DESCRIPCION DE LA COMPILACIÓN

Una característica crucial, y que diferencia a la tecnología y las ciencias de la ingeniería, de las ciencias naturales, es el hecho de que los ingenieros no sólo se preocupan por la parte de producción del conocimiento por el bien de los artefactos, sino también con la acción orientada a objetivos basados en ese mismo conocimiento. La orientación de la ingeniería hacia la acción tiene importantes consecuencias para la filosofía de la tecnología y para las ciencias de la ingeniería. Los temas a ser tratados a continuación, es una compilación de ideas y planteamientos por parte de varios autores, que ayudan a la comprensión del significado del modelado en las ciencias de la ingeniería. ¿Cómo se relaciona este aspecto de modelado con la acción, el lector podría preguntar, ya que los modelos y el modelado han sido investigados sustancialmente en el campo de la filosofía de las ciencias naturales? ¿Y cómo afecta el enfoque en la acción al carácter de los modelos de ingeniería y a las formas en que se producen y utilizan estos modelos? Tradicionalmente, los filósofos de la ciencia discernieron al menos tres características importantes de los modelos: la faceta representacional, la abstracción de los detalles, y finalmente el objetivo o propósito del modelo o la actividad de modelado (por ejemplo, Stachowiak [1973, p.131–132]). Es esta última característica, el objetivo de un modelo, que podría arrojar luz sobre el carácter especial de los modelos de ingeniería, ya que en la ingeniería, el propósito final del modelado es realizar artefactos fiables o procesos técnicos. Esto contrasta sustancialmente con las ciencias naturales donde, conceptualmente al menos, el objetivo subyacente a las actividades de modelado es adquirir conocimiento según el bien del conocimiento. El objetivo práctico de los modelos en las ciencias de la ingeniería se hará evidente de casi todas las contribuciones incluidas en esta compilación. Especialmente viene a la vanguardia en los capítulos de modelos como herramientas epistémicas, razonamiento basado en modelos y modelos a escala. Aparte de las posibles diferencias entre los objetivos de modelado en la ingeniería y las ciencias naturales, tenemos al menos otras dos razones para querer centrarnos en el modelado en la presente parte: la primera se refiere a la desaparición del paradigma de la tecnología como la ciencia aplicada, y el segundo tiene que ver con un renovado interés en el uso y la función de los modelos en la ciencia. Tradicionalmente, los filósofos de la ciencia no eran más que ciencia aplicada [Bunge, 1966] y por lo tanto no estaban muy interesados en las ciencias de la ingeniería. Sin embargo, la investigación detallada sobre la historia de la tecnología llevada a cabo por Edwin Layton, John Staudenmaier y Walter Vincenti llevó a afirmar que el conocimiento tecnológico está relativamente separado del conocimiento científico. Esta independencia y autonomía desafió la noción de que la tecnología es una ciencia aplicada e instó a los filósofos de la tecnología a abrir la caja negra y ver por sí mismos cómo se genera el conocimiento de ingeniería. La segunda razón es el renovado interés por el uso y la función de los modelos involucrados en la producción de conocimiento. Todo comenzó con [Morgan y Morrison, 1999] y pasó a producir muchos enfoques interesantes y vistas no convencionales sobre las funciones y usos de los modelos y el modelado. Aun así, gran parte de este renovado interés por los modelos no tiene en cuenta la distinción entre los usos específicos de los modelos en ingeniería, como el diseño y el comportamiento de artefactos, y el uso de modelos en las ciencias naturales. (Véase para una visión general clara [Frigg y Hartmann, 2006].) Por lo tanto el enfoque de la presente parte del modelado en las ciencias de la ingeniería, debe contemplarse en el contexto de los dos acontecimientos que acabamos de esbozar. Los ocho capítulos siguientes, giran en torno a tres puntos focales relativos a los modelos: cuestiones conceptuales, cuestiones empíricas y cuestiones metodológicas. En los dos primeros capítulos, abordamos las cuestiones conceptuales que rodean la noción de un modelo. Los dos capítulos pueden ser vistos como complementarios. El primer capítulo está dedicado a una visión histórica de la noción de un modelo. Allí, Roland Muller examina la gama de entidades conocidas como modelos, que van desde las herramientas que se utilizan para apoyar la fabricación y el diseño, hasta varios modelos educativos y matemáticos. En el segundo capítulo, Wilfred Hodges proporciona un análisis sistemático del modelado funcional y modelos matemáticos. Considera el papel de los modelos semánticos que sirven como entidades intermedias entre teorías y sistemas en el caso de diversos tipos de prácticas científicas y de ingeniería. Un aspecto del renovado interés por los modelos tiene que ver directamente con el estado de la vista semántica de las teorías y la afirmación de que la vista semántica no tiene en cuenta el carácter autónomo de los modelos. El segundo enfoque principal de la Parte IV se centra en el uso de modelos por los ingenieros cuando diseñan o desarrollan una mayor comprensión de los fenómenos técnicos. Mieke Boon y Tarja Knuuttila conciben modelos en las ciencias de la ingeniería como herramientas epistémicas y así presentan su enfoque como una alternativa a la visión semántica de los modelos. Desde su perspectiva pragmática, los autores se centran principalmente en la actividad de modelado en lugar de en los propios modelos. Ilustran su enfoque refiriéndose al motor de calor de Carnot, que según los autores es un ejemplo importante de un modelo de ingeniería con implicaciones prácticas. En el cuarto capítulo sobre 'Razonamiento basado en modelos en ingeniería interdisciplinaria', Nancy Nersessian y Christopher Patton estudian lo que los propios investigadores llaman los 'sistemas de modelos' de dos laboratorios de investigación de ingeniería biomédica (una ingeniería de tejido y un laboratorio de ingeniería neuronal). Se afirma que el razonamiento basado en modelos difiere sustancialmente del razonamiento deductivo formal, porque también depende del contenido y, por lo tanto, no es puramente formal. El quinto capítulo analiza las metodologías de escalado de ingeniería y revela que uno de los padres fundadores, William Froude, no basaba su conocida metodología de escalado en el análisis de dimensiones, como se supone comúnmente. Las preguntas importantes abordadas son: ¿Cuál es la base del método de escalado de Froude si el propio autor no lo encontró en números sin dimensiones? ¿Cuál es el estado de las leyes de modelos dentro del modelado a escala? ¿Tienen estas leyes contenido empírico o son meramente analíticas? El tercer y último punto focal, son las cuestiones metodológicas relativas al modelado. En el sexto capítulo, Susan Sterrett considera el análisis dimensional en el razonamiento basado en la similitud. Aunque la similitud y el análisis dimensional siguen siendo importantes en filosofía, ciencia y tecnología, no han recibido la atención que merecen en la filosofía contemporánea de los estudios científicos. El capítulo comienza explicando las proporciones, la similitud física y las cantidades, y llega —a través de dimensiones y sistemas coherentes de unidades— a una homogeneidad sin dimensiones; termina con el teorema de Buckingham, y con similitud parcial. En el proceso, el autor también se ocupa de cuestiones interesantes como, por ejemplo, '¿qué tiene prioridad lógica: escalas, unidades de medida o las cantidades medidas?' Ella basa la respuesta en el concepto de Lodge de 'ecuaciones de cantidad'. El séptimo capítulo está estrechamente relacionado con el anterior, ya que se concentra en la teoría de la medición en ingeniería. Su autor, Patrick Suppes, que es, por supuesto, uno de los padres fundadores de la visión de representación de la teoría de la medición, caracteriza un procedimiento de medición utilizando dos problemas fundamentales. El primero es el problema de representación que dicta, que la estructura de los fenómenos debe ser la misma que la estructura de un conjunto de números. Dado que la respuesta a la pregunta de representación no determina de manera exclusiva la estructura de la teoría, debe probarse un teorema de invariancia para la representación y que responde a la segunda pregunta fundamental relativa a la determinación del tipo de escala del procedimiento de medición. Después de eso, el autor proporciona los teoremas de representación e invariancia para cuatro tipos de escala. La segunda parte de este capítulo trata de los errores de medición, un tema obligatorio para cualquier teoría de la medición aplicada a la práctica de ingeniería. Dado que muchas explicaciones tecnológicas utilizan modelos y simulaciones, estas explicaciones constituyen el tema central del último capítulo de esta compilación. A diferencia de las explicaciones científicas, las explicaciones tecnológicas han atraído en el pasado muy poca atención de los filósofos de la ciencia. Por lo tanto, en muchos aspectos este capítulo es tanto un intento de explorar el territorio como de proporcionar una teoría adecuada de la explicación tecnológica. A primera vista, uno podría esperar que las explicaciones tecnológicas sean similares a las explicaciones científicas, ya que tanto se refieren a los procesos físicos que explican los fenómenos naturales, como a la forma en que funciona un artefacto técnico. Sin embargo, Joseph Pitt argumenta que las explicaciones técnicas implican mucho más. Por ejemplo, si queremos explicar cómo un artefacto ha llegado a ser lo que es, no podemos limitarnos a causas eficientes, (utilizar la terminología aristotélica), de la manera que se ha convertido en costumbre en la explicación científica. Además, las explicaciones tecnológicas deben aludir a otras causas aristotélicas: las causas materiales, formales y finales. La razón de esto radica en la implicación de una multiplicidad de factores, incluidos los sociales. Claramente, esta compilación no cubre todas las cuestiones relevantes para los modelos de ingeniería. Al menos tres áreas más vienen a la mente. En primer lugar, hay muchas preguntas filosóficas interesantes relacionadas con los métodos y técnicas numéricas y aproximadas que impregnan las ciencias y prácticas de ingeniería. Un ejemplo importante es el método de elementos finitos (FEM), que se ha desarrollado para hacer frente a la intratabilidad de la solución analítica a las ecuaciones que describen la física de las láminas de avión. En segundo lugar, los modelos de ingeniería se utilizan a menudo como planos para el diseño, fabricación y mantenimiento de artefactos y procesos tecnológicos. A este respecto, el lenguaje de modelado unificado (UML) forma un interesante tema de análisis filosófico, ya que UML funciona como un lenguaje general para estos esquemáticos. En tercer lugar, los temas importantes para el análisis filosófico se encuentran en el dominio de ingeniería, técnicas de simulación de la que frecuentemente se despliegan con fines explicativos.

CAPITULO II

LA NOCIÓN DE MODELO: UN PUNTO DE VISTA HISTORICO

Por Roland Müller

"El significado de una palabra es su uso en el lenguaje." "Lo que hacemos es devolver las palabras de sus metafísicos a su uso ordinario". "Una fuente principal de nuestra falta de comprensión es que no tenemos una visión clara del uso de nuestras palabras". Investigaciones filosóficas [Wittgenstein, 1953, n.ro 43, pp. 116, 122].

1 INTRODUCCION

Incluso si nos limitamos a la ciencia y la tecnología, la gama de usos de la palabra "modelo" es vasta, un paraíso de lexicógrafos. Para controlar este rango, teóricamente se debe analizar cuántos significados tiene la palabra 'modelo' y cómo están relacionados entre sí. Pero en la práctica esto puede ser imposible de hacer, debido por lo menos a las tres razones siguientes. En primer lugar, podemos clasificar los modelos de acuerdo con qué tipos de objetos son, o de acuerdo con lo que se pretende hacer. Estas dos clasificaciones a menudo difieren. Dos científicos pueden estar de acuerdo en que algo es un modelo, pero lo utilizan para propósitos muy diferentes, por ejemplo para explicar y predecir. Dos ingenieros pueden utilizar dispositivos muy diferentes, por ejemplo un prototipo mecánico y una simulación por ordenador, ambos llamados "modelos", para un mismo propósito. En segundo lugar, los límites entre un tipo de modelo y otro a menudo son muy borrosos. Esto se debe en parte, a que la construcción y el uso de modelos pueden depender profundamente de los hábitos y las culturas. También es porque los modelos se encuentran cerca del borde creativo del pensamiento; cualquier avance en la ciencia o la tecnología puede lanzar nuevas aplicaciones de la palabra 'modelo'. En resumen, la palabra "modelo" es trans-disciplinaria y tiene una gama abierta de aplicaciones. En tercer lugar, la literatura sobre los "modelos" durante el último medio siglo, contiene varias clasificaciones que dependen de doctrinas filosóficas que son al menos polémicos. Por ejemplo, algunos escritores han sugerido que una teoría sobre algún aspecto del mundo debe ser considerada como una verdadera descripción o como una "analogía". Otros escritores han sugerido que tenemos la opción de elegir entre tomar modelos para que sean "descripciones" y hacerlos "no lingüísticos". (Frigg y Hartmann afirman la dicotomía [2008, sec. 1.1]; algunos autores la llevan mucho más allá.) En este capítulo vamos a estudiar la gama de cosas llamadas 'modelo', comenzando con ayudas para la fabricación y el diseño, y pasando por la explicación científica a los modelos educativos y matemáticos. Dentro de estas amplias agrupaciones basaremos nuestro acuerdo en el desarrollo histórico, más que en análisis filosóficos más recientes. El capítulo III es, en cierto sentido, un complemento de este: ignora la historia y aborda algunas de las preguntas que surgen si se trata de hacer una teoría general de los modelos. Nos concentramos en la palabra "modelo" en sí, aunque debemos añadir dos reservas. En primer lugar, muchas de las cosas llamadas 'modelo' también tienen otros nombres como 'estructura', 'representación', 'hipótesis', 'plan', 'simulación', etc. etc. Tomaremos nota de algunas de estas a medida que avanzamos. En segundo lugar, hay varias cosas que son muy similares a las cosas llamadas modelos y probablemente podrían haber sido llamadas modelos, aunque de hecho no lo son o no lo fueron. De hecho, muchas cosas que más tarde llegaron a ser llamadas "modelos" fueron ampliamente utilizadas antes de que recibieran este nombre. Esto es particularmente cierto en la historia temprana de la noción; hoy en día un nuevo tipo de modelo es probable que se llame un "modelo" desde el principio. Hemos dado una serie de ejemplos de estos modelos aún no bautizados, ya que ayudan a mostrar por qué surgió la necesidad de la palabra 'modelo'. Se pueden encontrar muchos más ejemplos en el archivo del autor [Maller, 2008].

2.- ORIGEN DE LA PALABRA MODELO

La línea de descenso de la palabra «modelo» no ha sido indiscutible. Según la teoría etimológica convencional, la palabra "modelo", desciende a través de los diminutivos 'modellus' y 'modulus' de la palabra latina 'modus', que significa 'medida'. «Modus» deriva de la raíz indoeuropea «med-» [Pokorny, 1949; Shipley, 1984] que también significa «medida», «tomar las medidas apropiadas». Sin embargo, según otros, con los que el presente autor está de acuerdo, el modelo no deriva de «modellus», sino de «módulo». Después de todo, mucho antes de 1300 D.C. encontramos en alemán 'Modul' y 'Model' (por ejemplo, en las canciones de amor cortesanas), y en francés 'modle' y 'molle', descendiendo inmediatamente de 'modulus' [von Wartburg, 1966].

Desde mediados del siglo I a. C., el diminutivo "módulo" y su forma verbal 'modulor' comienzan a aparecer en la literatura latina. Su significado básico en esta fecha sigue siendo 'medida' (como en Horace y Varro), pero también hay una asociación particular con la música, con referencia a medidas de tiempo y tono [Lewis, Short, 1879; Deslumbramiento, 1982]. El conocido arquitecto Vitruvio utiliza 'modulus' en sus Diez Libros sobre Arquitectura (alrededor del 23 a. C.) generalmente como un estándar arquitectónico, a saber, el radio de una columna [Vitruvio, 2004]; este parece ser el primer uso de ingeniería registrado de la palabra.

En sus dos libros sobre el suministro de agua de la ciudad de Roma (100 D. C.) el político y escritor Sexto Julio Frontinus, utiliza la palabra 'módulo' alrededor de treinta veces como "una tubería de diámetro especificado utilizada para controlar la velocidad de flujo de agua, un adyuvante" [Glareare, 1982]. Parece que los 'moduli' son tuberías estandarizadas disponibles en veinticinco tamaños.

Alrededor del año 200 d. C., Tertullian utiliza 'modulus' con varios significados, en particular las figuras manipuladas empleadas por los escultores, por ejemplo como base para una escultura de mármol ("indecircino et plumbe is moduli sprae paratio simulacri, en marmor, in lutumuel aes ue largentum, uel quodcum que placuit deum fieri, transmigratura"; Nat. I, 12,9 [2004]).

Desde el Imperio Romano tardío hasta finales de la Edad Media, la palabra "módulo" y sus derivados tienden a desvanecerse de la vista en el registro literario, y nuestra evidencia de su progreso en las lenguas europeas modernas es irregular. El francés (von Wartburg, [1966]) redujo el 'módulo' a 'modle', 'mole' y 'moule', que entró en inglés como 'molde' (como en el molde de queso). Más tarde, el inglés tomó la palabra "módulo" directamente del latín, produciendo 'módulo' y el término científico 'modulus'.

Pero también la doble forma diminuta 'modell' comenzó a aparecer, como lo atestigua el 'modello' italiano. Así, en el italiano del siglo XIV encontramos 'modelo' (estaño o molde para hornear) y 'modello' (dibujo), este último con respecto a la construcción de la Cúpula de Florencia (véase [Bernzen, 1986; Müller,1983]). Desde principios del siglo XV también encontramos 'modello' utilizado para modelos arquitectónicos 3D, especialmente para los diversos modelos de Brunelleschi para la Cúpula delDomo de Florencia y para los ascensores y grúas necesarios para construirlo. A continuación veremos cómo Alberti utilizó el 'modello' a mediados del siglo XV en arte y arquitectura. El 'modello' italiano entró en francés en 1542 como 'modelle' y 'modèle', y en inglés en 1570 como 'modelo' o 'modell', y la variedad de significados se expandió rápidamente en la abundancia actual.

La gama de significados de 'modelo' a principios del siglo XVII ya es sorprendente. Así Shakespeare en “Muchoque hacer sobre nada” (1613) I.3:

“Borachio Puedo darte información de un matrimonio previsto.

Don John, ¿servirá para que cualquier Modell construya travesuras?”

Observe tanto el sentido literal (modelo de un edificio) como la metáfora (modelar el comportamiento de uno en algo).

En 1627 el editor de la Nueva Atlántida de Francis Bacon abre su prólogo con las palabras:

> “Esta fábula mi Señor ideó, hasta el final que podría exhibir en ella, un Modell o Descripción de un Colegio, instituido para la Interpretación de la Naturaleza, y la Producción de Grandes y maravillosas Obras para el beneficio de los hombres [...] Ciertamente el Modell es más vasto, y Alto, entonces posiblemente puede ser imitado en todas las cosas; A pesar de que la mayoría de las cosas están dentro del Poder del hombre para realizar [Bacon, 1627; ortografía de la edición de 1628].”

El propio Bacon (escribiendo en latín en 1620 [Bacon, 2004, i.110 y 124]) utiliza 'modulus' tanto para el tipo de impresión, como para los intentos de 'copiar el mundo en la mente humana'. Aquí ya estamos cerca de las nociones modernas de modelado científico; pero Bacon no es el primer ejemplo. En 1576 el astrónomo Thomas Digges se había referido al uso por parte de Copérnico de un "nuevo teórico o modelo del mundo".

La palabra «modelo» y sus cognados eran comunes en las principales lenguas europeas hasta la actualidad, en todos los significados que hemos señalado. Pero desde mediados de la década de 1940 ha habido un crecimiento explosivo de su uso en la ciencia y la tecnología. Lo podemos ver en las estadísticas de los archivos de la Deutsche Bibliothek en Frankfurt, relativas a títulos de libros —principalmente en alemán— que utilizan las palabras 'Modell', 'Modellierung', 'Modellversuche' y similares. Encontramos el siguiente número de títulos por año:

1950: 30

1960: 50

1970: 350

1980: 700

1990: 1100

2000: 1950

2004: 2300

En los diez años 1990-1999 aparecieron más de 17.000 títulos que incluyen estas palabras. El catálogo en línea de las bibliotecas británicas más grandes (COPAC) tiene durante el mismo período de tiempo más de 16.000 títulos en inglés (sin duda con muchos dobletes).

Sería interesante conocer las razones de esta explosión. Las palabras se vuelven de moda por razones que a menudo son difíciles de descubrir. Tal vez la razón principal ha sido el crecimiento del interés en la metodología (para la educación, para el análisis teórico, para impresionar a los organismos que otorgan subvenciones,...), y ' modelo' es una de las palabras más metodológicas que conocemos.

Mientras que la palabra 'modelo' floreció, la palabra 'módulo' siguió su propio camino. Desde la Segunda Guerra Mundial se ha utilizado regularmente para un sistema semi-independiente o estandarizado, generalmente, uno que ocurre como un componente de un sistema más grande. Lo encontramos utilizado para muebles y para piezas electrónicas que son "sub ensamblajes fabricados individualmente". Hemos tenido módulos como secciones de una nave espacial desde las misiones Apolo alrededor de 1960. Los módulos como unidades de un programa de formación han estado con nosotros desde 1966. Pero este significado debilitado de 'módulo' probablemente no es nuevo; es difícil pensar en algo más preciso que el matemático Richard Dedekind, podría haber tenido en mente cuando en [Dirichlet, 1871] acuñó el nombre de 'Modul' para ciertas subestructuras de campos. El término de Dedekind fue generalizado en la década de 1920 cuando se fundó la rama del álgebra conocida como teoría de módulos.

Un sistema se describe como "modular" cuando se construye de piezas separadas, cada una de las cuales tiene su propia función claramente definida. Este uso parece haber aparecido a principios de la década de 1970 en electrónica e informática, donde la importancia del diseño modular es, que una parte de un sistema o programa puede ser reemplazada por otra unidad que realiza la misma función, sin interrumpir el resto de la Sistema. Por ejemplo, la patente [Cheney y Kuczura, 1976] destaca que su carácter "modular“ permite 'crecimiento fácil y adiciones de paquetes de servicios orientados a características'. La noción de modularidad se hizo importante en la ciencia cognitiva, donde por ejemplo se preguntó si el cerebro tiene módulos que son específicos para el lenguaje. Fodor [1983] sirvió como foco para estas discusiones.

Observamos brevemente que todavía se puede encontrar la medida del sentido original. Ejemplos son el módulo de Young (una medida de elasticidad), y el criterio arquitectónico de Le Corbusier [1951] 'Modulor'.

3.- MOLDES

Las formas huecas se han utilizado durante más de 10.000 años para formar ladrillos, pasteles, metales, etc. Sin embargo, El uso de formas convexas para crear patrones, es aparentemente más reciente. Pero al menos podemos rastrearlo al uso de palos para impresionar a las letras en las tablas de arcilla, como en el alfabeto cuneiforme babilónico [Glassner, 2000], y las tabletas griegas escritas en Lineal A y Lineal B. En Japón se conocía una especie de textiles impresos en el siglo I D.C. Los grabados reales sobre lino brillante y sin color se conocen desde el siglo IV desde Egipto y desde el siglo VII desde Europa y las zonas coptas del norte de África; del mismo modo impresiones de color chino en seda.

En 175 D.C., los eruditos chinos comenzaron a cortar las principales obras de la literatura clásica china en placas de piedra. A partir de estas placas, se hicieron miles de copias pobres: el papel humedecido fue prensado en las placas y luego suavizado con un pincel y tinta, de modo que los signos tallados se destacaron en blanco entre el fondo negro. La impresión con tipo móvil de caracteres se ha dicho que se ha practicado en China ya alrededor de 1040 D.C. En Europa Johannes Gutenberg lo introdujo alrededor de 1440. Después de imprimir toda la Biblia, perdió bienes y charlas en un caso judicial y murió como un hombre en banca rota [Scholderer, 1963].

'Modellus' se encuentra en Gran Bretaña ya en el siglo XIV; se conjetura que se refiere a un molde de queso "recipiente, molde" en [Latham, 1965]. A principios del siglo XVI, el uso de "molde" o "modelo" tanto para moldes huecos como para formas de impresión convexa estaban bien establecidos. Así, en el Diccionario de Randle Cotgrave francés-inglés [1611] leemos:

Modelador: Para modelar, formar, moda, parcela, molde.

Modelle (f.): Un modell, patrón, molde, trazado, forma, marco.

Moule (m.): Un molde (en el que una cosa se echa, forma o forja;)

Chandelles de moule. Velas hechas en moldes; (genial) Velas de Navidad.

Moulé: m. ee. (f.) Moldeado; molde o enmarcado en un molde.

Mouler. Para moldear, o fundir en un molde; para enmarcar, o forjar por molde; también, para nombrar un molde para, prescribir un tamaño para. Moulle. Como Moule.

En la famosa Enciclopedia Francesa [Diderot y D'Alembert, 1765, Vol. 10], leemos bajo 'modèle':

> dans les ouvrages de fonte, le modèle est en quelque façon l'ouvrage même, dont le métal prend la forme; la matière seule enfait la différence; une couche deciment & de terre, de la forme de la cloche qu'on veut fondre, & de la même épaisseur que la cloche doit avoir.

Los moldes todavía se conocen como moldes hoy en día, pero a veces también como modelos. Por ejemplo, en Alemania, las latas para hornear, los formularios de impresión, los sellos y los moldes se denominan en parte "Modelo", en parte "Modell" (en Suiza también 'Foermli', es decir, pequeñas formas). Sin embargo, las cosas en relieve o formadas rara vez se llaman 'Modell' (un ejemplo raro son las fundiciones artísticas) o 'Model' (por ejemplo, en Suiza 'model bacon' y 'es Moedeli Anke', un pedazo de mantequilla en forma de un gateador).

Llamamos la atención sobre una característica de los moldes, que se aplica también a algunas, pero no a todas las cosas conocidas como modelos. Un molde se puede utilizar indefinidamente muchas veces, para crear muchos objetos. De hecho, este es a menudo su propósito principal, como con el tipo de impresión. Todos los objetos que provienen del mismo molde serán similares; en algunos contextos decimos que son 'el mismo modelo'.

Este uso también se aplica de manera más general a las cosas que se hacen de acuerdo con la misma especificación, incluso cuando no hay modulo físico. Se remonta a alrededor de 1840. Se utilizó para productos industriales fabricados en grandes cantidades [Landes, 1968]. Uno de los primeros fabricantes en introducir la producción en serie de objetos fue Samuel Colt. Vendió más de 330.000 de su modelo 'bolsillo', también llamado 'Wells & Fargo', entre 1849 y 1875. El inglés ha hablado de "modelos parisinos" (en la moda) desde 1859, y de "modelos" de automóviles desde 1900. De los legendarios ejemplares 'Model T' de Henry Ford se produjeron 15 millones de ejemplares entre 1908 y 1927 [Clymer, 1955].

La palabra «molde» todavía se produce en relación con el modelado; por ejemplo Boumans [1999] describió un componente de modelado que él llamó 'moldeo matemático'.

4.-MODELOS COMO ETAPAS DEL DISEÑO

Desde muy temprano, los artistas han hecho bocetos preliminares o maquetas antes de producir su trabajo final. Antes de los tiempos modernos, uno de los ejemplos más informados es el modelado para la Cúpula de Florencia, mencionado en la sección 2 anterior. Sabemos, por ejemplo, que se hicieron modelos para varias partes de la Cúpula, incluso para los ascensores y grúas, y que algunas piezas tenían módulos alternativos, de modo que se podía elegir entre ellos [Bernzen, 1986; Müller,1997; Saalman, 1980; Ferguson, 1992, p.66].

Este uso de la palabra 'modelo' deja algunos aspectos del significado poco claros. ¿Es crucial que el artista copie el modelo, o el modelo simplemente le ayude a aclarar un diseño que se encuentra en otra parte, ya sea en el mundo real o en su mente? ¿El modelo tiene que ser algo que construya? ¿Tiene que ser pequeño, como el modelo del arquitecto, pero a diferencia de un boceto preliminar para una pintura? Los escritores posteriores resolvieron estas ambigüedades, pero no siempre de la misma manera. Supongamos, por ejemplo, que hago una escultura de su esposa, y como primer paso hago un yeso. ¿Cuál es mi modelo, tu esposa o el yeso?

'El yeso', dice Leon Battista Alberti a mediados del siglo XV [Alberti, 1847, Libro i p.1 80]. Para Alberti, el artista puede trabajar ya sea desde 'vivo' o desde 'modello'. 'Su esposa', dice la Enciclopedia Francesa, en [Diderot y D'Alembert, 1765, vol. 10] bajo la palabra 'modèle':

tout ce qu'on regarde comme original, &dont on se propose d'exécuter la copie. Ce mot se prend au simple & au figuré, au physique & au moral. Exemple: une femme, modèle précieux pour un peintre ...

Las modelos que anuncian ropa son presumiblemente descendientes de la 'femme, modèle précieux' de la Encyclopédie.

Además de endurecer las definiciones, los escritores sobre modelos artísticos y de diseño poco a poco construyeron una teoría de estos modelos. Lo ilustramos de cuatro autores: Alberti alrededor de 1450/60, Martini unos años más tarde, Sturtevant en 1612 y Leibniz en 1669. Ya hemos citado el trabajo de Alberti en la escultura. Casi al mismo tiempo, de hecho, cuando se terminaba la Cúpula de Florencia, Alberti también escribió un libro sobre arquitectura. Las ventajas más importantes del uso de modelos, dice, son la viveza, la manipulabilidad y la improvisabilidad.

> Y allí puede agregar fácil y libremente, reducir, alterar, renovar y, en resumen, cambiar cada cosa de un extremo a otro, hasta que todas y cada una de las piezas sean como las tendría, y sin culpa. [Alberti, 1755, Libro II, cap. I, p.22]

También recomienda producir copias, para que el modelo original se conserve, incluso cuando el arquitecto juega con cambios en las copias.

> Asegúrese de tener un modelo completo del todo, por el cual examine cada minuto parte de su futura estructura ocho, nueve, diez veces más, y de nuevo, después de diferentes intermedios de tiempo. [ibid, Libro IX, cap. VIII, p. 203]

Francesco di Giorgio Martini fue un escultor o, un arquitecto y un ingeniero. Escribiendo 1480/90, hizo explícitos los aspectos cognitivos de la construcción de modelos:

> Mientras que es difícil demostrarlo todo a través de dibujos, ni es posible en absoluto expresar muchas cosas con palabras, ... por lo que es necesario hacer un modelo de casi todos los objetos. [Martini, 1967, I, p.142]

En 1612 el ingeniero Simon Sturtevant publicó un libro notable sobre Invenciones Metálicas, también conocido como Heurética [Sturtevant, 1612]. En este libro define Heurética como 'el Arte de la invención', enseñando cómo encontrar nuevo, y a juzgar a los viejos'. Esta doctrina de la invención consiste en una parte real y técnica. La primera consiste en "los instrumentos y cosas reales que pertenecen a las invenciones", la segunda se refiere a "el hábito y la facultad hábiles" de los artesanos. Las propias invenciones se pueden diferenciar por la 'magnitud ... grandeza o cantidad'. Tres tipos de modelos resultan: moddle, protoplastia y mechanick. El 'moddle' es un 'Mechanick', que representa y muestra las partes básicas y los contornos de una invención sin funcionar realmente. Por ejemplo, no podemos esperar que un modelo de molino de viento muela maíz. Dicho modelo puede ser más pequeño, o también, cuando los detalles deben mostrarse, más grande que el objeto representado. Se puede dibujar o pintar (y luego es 'superficial'), o 'realmente' como un barco modelo. El prototipo de hoy en día del 'Protoplast' cumple todas las funciones del dispositivo final y funciona de forma productiva, pero está abierto para nuevos refinamientos y adaptaciones a condiciones especiales. El primer protoplastia de un grupo de máquinas o aparatos es el "Arquetipo del Protópto, por ejemplo, el primer molino de viento que fue capaz de moler maíz. En un capítulo adicional, Sturtevant da 'CannonsoReglaspara servir al juez de losgoodness' de una invención o una mejora, por lo que desarrolla una teoría diferenciada de equivalencia utilizando los criterios. Equi-suficiencia, Equi-cheapness, Equi-excelencia. En 1669 el matemático y filósofo Leibniz elogió la construcción de 'modulis' a pequeña escala con el fin de diseñar fortalezas en su boceto de los 'Arsinveniendi'. Luego menciona las colecciones de modelos, que fueron muy populares en su tiempo: 'de TheatroNaturae et Artisseu de Modulisrerumipsarumconservatoriis' [Leibniz, 1903, p.163]. Poco después propuso en su Atlas universalis, un departamento de objetos, que «se puede presentar a la vista»: «dispositivos mecánicos, incluidas máquinas y modelos de todo tipo», [ibid, p.223]. Leibniz fue sin duda influenciado por la Academia Francesa de Ciencias, que había comenzado a recoger modelos de inventores con la esperanza de obtener reconocimiento oficial por sus productos. Se publicó un catálogo de estosmodelos en sietevolúmenes: Machines et inventions approuvées par l'Académie royale des sciences, depuis son 'Etablissement jusqu'au présent, Paris, 1735–77; el primer volumencontiene los objetospresentados antes de 1700. Las colecciones más recientes de modelos de patentes en varios países son la evolución de esta misma idea.

5.- HERRAMIENTAS MODERNAS PARA DISEÑADORES

A raíz de la revolución industrial, los siglos XIX y XX trajeron un cambio escalonado en la sofisticación de las herramientas para ayudar al diseñador. Mencionamos tres ejemplos importantes, a saber, el modelado a escala, la simulación por ordenador y el refinamiento escalonado.

(a) Modelado de escala. El diseñador de un transatlántico o un avión debe comprobar que el vehículo se comportará según lo previsto. Un tipo obvio de prueba es construir un modelo a escala y probarlo en un túnel de viento o un tanque de agua. Pero como Galileo ya explicó, en relación con animales de diferentes tamaños [1638, Segundo Día] algunas propiedades físicas dependen de la longitud, algunas de la superficie y otras del volumen; por lo que una copia que se encogiera en proporción estricta no se comportará de la misma manera que el vehículo a gran escala.

Un pionero del modelado a escala de buques fue William Froude (1810-1879), quien construyó modelos muy precisos y probaron los tanques de su propio diseño, utilizando sus propios instrumentos de medición diseñados específicamente. Hoy en día es recordado sobre todo por su análisis matemático de las dimensiones de algunas de las cantidades clave, y un método para predecir la fricción de un recipiente a escala completa utilizando las medidas de la fricción a pequeña escala. Así es como el número de Froude recibió su nombre — El propio Froude nunca usó este número en sus escritos publicados.

Otro número sin dimensiones en la dinámica de fluidos es el número Reynolds, introducido por Osborne Reynolds en [1883]. Los números sin dimensiones son crucialmente importantes para el modelado de escalas, ya que permiten al modelador utilizar diferentes escalas en diferentes dimensiones y estar seguro de que el comportamiento del objeto final se puede leer con precisión del comportamiento del modelo. Las matemáticas involucradas se conocen hoy en día como análisis dimensional; fue famosamente explorado por Lord Rayleigh en [1915]. Los libros de texto incluyen [Bridgman, 1922], [Weber, 1930] y [Langhaar, 1967]. Véase también el capítulo VIde esta compilación.

(b) Simulación por ordenador y diseño asistido por ordenador en cierto sentido, la simulación por ordenador va en la dirección opuestapara escalar el modelado. Comparten la característica de que confían en conocer las leyes obedecidas por el objeto que se está modelando. Pero mientras que el modelado a escala encuentra un objeto diferente obedeciendo esas leyes, la simulación por computadora funciona directamente con las propias leyes y no con un objeto que las obedece. Una computadora es generalmente más barata de comprar y ejecutar que un túnel de viento, y se puede simular en una computadora cosas que no sería ético hacer a un organismo vivo.

El primer ejemplo de simulación en un ordenador digital consistió en utilizar el ordenador para resolver ecuaciones que era imposible resolver de cualquier otra manera. En 1946 StanislawUlam tuvo la idea de que se podían aproximar soluciones de algunas ecuaciones combinatorias o diferenciales, leyendo las ecuaciones como descripciones de un proceso en el que se aplica una operación aleatoria muchas veces, como dejar caer un alfiler sobre una hoja forrada de papel, por citar un ejemplo que se da a menudo. Las computadoras son muy buenas para realizar una operación aleatoria muchas veces. Discutió la idea con John von Neumann, quien en esa fecha estaba profundamente involucrado en el desarrollo de la primera generación de computadoras digitales. Nombraron el enfoque 'método Monte Carlo'. El resultado fue una serie de simulaciones por computadora de procesos termonucleares [Eckhardt, 1987].

De hecho, muchos procesos de la vida real son realmente los resultados acumulados de realizar un rango limitado de operaciones aleatorias muchas veces. La previsión del clima es un ejemplo obvio, y fue una simulación por computadora de un sistema meteorológico que puso a Edward N. Lorenz en el camino hacia la teoría del caos. [Lorenz, 1963; este artículo cita 'cálculos ... realizado en un Royal McBee LGP-30 máquina de computación electrónica ' a una velocidad de un segundo por iteración].

La idea de utilizar computadoras para la simulación de procesos complejos se extendió muy rápido. En [1960] D. G. Malcolm presentó una bibliografía sobre el uso de la simulación en el análisis de gestión. En su párrafo de apertura dijo: "En la simulación del sistema, la computadora se utiliza típicamente en la resolución de problemas asociados con las tareas específicas de diseñar mejores sistemas, entender el funcionamiento de los sistemas operativos y estudiar interacciones hombre-máquina ». Así que el diseño asistido por computadora ya estaba en pleno apogeo, unos diez años antes de que las computadoras digitales estuvieran a disposición del público.

Un aspecto importante de las computadoras es que no sólo resuelven ecuaciones; también muestran los resultados en la pantalla. La pantalla no solo crea un modelo visual; el usuario puede interactuar con el equipo para probar los resultados de los ajustes. A mediados de 1960 estas ideas fueron exitosas al estudiar la estructuras de moléculas complicadas [Levinthal, 1966]. La realidad virtual es un desarrollo adicional de técnicas similares. Cuando el modelado por computadora implica la visualización, tiende a depender de una amplia gama de experiencias, como Donna J. Cox ha enfatizado con su noción de un 'Equipo de Renacimiento' que reúne a artistas, científicos y tecnólogos para producir imágenes y películas de datos científicos [Cox, 1988].

Muchas técnicas tradicionales y preferidas de redacción y diseño de "modelos" para edificios, barcos o automóviles, circuitos eléctricos o moldes de inyección han sido sustituidas desde 1960 por Computer Aided Design (CAD). Este tipo de uso de computadora según la investigación militar estadounidense sobre viajes espaciales. Más tarde se puso a disposición del público. En 1964 IBM desarrolló el primer ordenador CAD, el 'System 2250', [Bissell, 1990]. Una primera introducción general al campo es dada por Charles Russell Mischke [1968].

(c) Refinamiento escalonado. El refinamiento escalonado es una herramienta de un tipo muy diferente de (a) y (b). Es una metodología para gestionar el proceso de emparejamiento del objeto diseñado y su especificación. El nombre proviene de la ingeniería de software [Wirth, 1971], aunque se aplican metodologías similares en otras áreas bajo nombres como 'descomposición funcional'. Como su nombre indica, la idea es comenzar con una especificación del sistema a construir, separar los diferentes requisitos quedeben cumplirse y trabajar progresivamente hacia descripciones más concretas de las unidades que satisfagan los requisitos.

6.- MODELOS DEL MUNDO

Vimos que el uso de la palabra "modelo" para las descripciones científicas del mundo se remonta al siglo XVI. A medida que la investigación científica se expandió y tomó nuevas formas, aparecieron nuevos tipos de "modelo". Los puntos de inflexión históricos son siempre un poco arbitrarios, pero puede ser seguro señalar tres momentos clave. El primero fue a mediados del siglo XIX, cuando muchos físicos líderes llegaron a considerar los "modelos" como una parte esencial de la metodología científica. El segundo fue aproximadamente cien años más tarde, después de la Segunda Guerra Mundial, cuando los filósofos de la ciencia se dieron cuenta de que se necesitaba algún relato coherente del papel de los modelos en el progreso científico. El tercero fue el giro cognitivo, digamos alrededor de 1980, cuando los psicólogos y otros utilizaron la noción de un modelo para explicar cómo cada uno de nosotros, incluso el menos científico de nosotros, llega a dar sentido al mundo.

Estos tres momentos dividen convenientemente la historia del modelado científico en cuatro segmentos.

6.1 Modelado científico temprano

En [1576] Thomas Digges escribió sobre Copérnico:

> "Pero en esta nuestra era, una raro idea seviene estudiando desde hace mucho tiempo, generando mucha preocupación, y la invención rara entregó un nuevo Theorick o modelo del mundo, la teoría argumenta que la tierra no descansaba en el Centro de todo el mundo, pero sólo en el centro de este nuestro mundo mortal o Globo de Elementos".

¿Qué fue lo que contó como modelo en la obra de Copérnico? En las propias palabras de Copérnico,

> “el astrónomo no puede, por ninguna línea de razonamiento, alcanzar las verdaderas causas de los movimientos [celestes], [así que es su trabajo] pensar o construir cualesquiera causas o hipótesis que le plazca de tal manera que, por la asunción de estas causas, esos mismos movimientos se pueden calcular” ... [Hawking, 2002, p.7]

Veremos que palabras como estas se utilizaron en siglos posteriores para distinguir entre una teoría (que tiene como objetivo afirmar los hechos sobre el mundo) y un modelo (que nos da algún tipo de información o perspicacia sin pretender ser fáctico). Pero en el caso de Copérnico, una razón más probable para poner estas palabras al frente en su introducción fue tranquilizar a la Iglesia Católica de que no iba a asustar a los caballos. Sabemos lo que le pasó a Galileo cuando mostró menos humildad. De hecho, para los cientos de páginas restantes de su obra, Copérnico escribe exactamente como si estuviera tratando de establecer los hechos del caso, y sus causas, y Digges parece haberlo leído de esta manera también.

Como ya hemos mencionado en la sección 2, para 1620 Francis Bacon también estaba utilizando la palabra "modelo" en el caso una copia que hacemos de algo que ya existe en el mundo.

> Porque yo siento bases en el intelecto humano para un verdadero patrón del mundo (verum ejemplar Mundi) como lo encontramos en realidad y no como la propia razón privada de alguien que se lo entrega. Y esto no se puede lograr a menos que emprendamos una muy laboriosa disección y anatomía del mundo. Pero proclamo que los patrones de mundos arqueados y (si se quiere) de mundos ('Modulos vero ineptos Mundorum') que las fantasías de los hombres han arrojado a sistemas filosóficos deben ser completamente destruidos. [Bacon, 1620, p. 124]

El uso por parte de Bacon de 'módulo' aquí es interesante. Al igual que el modelo del arquitecto, el modelo de Bacon es similar a algo "por ahí" y está más cerca de la mano que lo que se parece. También es una construcción humana como el modelo del arquitecto. Las razones de Bacon para elegir la palabra 'modelo' probablemente involucran algunas o todas estas propiedades. Pero a diferencia del modelo del arquitecto, el mundo (la cosa 'ahí fuera') fue lo primero, y el modelo se crea como una copia de él.

También los modelos y ejemplares de Bacon están 'en la mente humana'; no son objetos físicos como el modelo del arquitecto. Pero ya Copérnico había utilizado objetos físicos de un tipo, a saber, alrededor de un centenar de diagramas impresos. La segunda mitad del siglo XVII fue un momento de auge para los diagramas científicos. Podemos citar las imágenes biológicas de Leeuwenhoek [Schierbeek, 1959] o las ilustraciones de Hooke de estructura cristalina [1665]. Estos autores no describieron sus diagramas como modelos; pero Ford [1993, p.137] comenta, 'Hooke muestra una serie de lo que ahora podríamos denominar 'modelos moleculares', relacionando su orientación con las facetas que deben resultar'.

Una manera de dar sentido a un fenómeno, es describir cómo se podría construir una máquina para producir o imitar el fenómeno. Hoy en día una gran parte del programa de Inteligencia Artificial se basa en tal idea. Pero la idea se remonta al menos a 1616, cuando

William Harvey en sus notas manuscritas sobre la circulación de la sangre, afirma haber demostrado 'que la sangre fluye en continuo flujo de los pulmones hacia la aorta como por dos válvulas de una bomba de agua utilizada para levantar agua' [Van Leeuwen et al., 1946, p.75] véase también [Vonessen, 1989]. En el siglo XVIII el estado y la economía, a menudo eran considerados como máquinas. El comisionado J. H. G. Justi escribió en [1764, p.86-87]: 'Un estado establecido perfecto tiene que ser exactamente como una máquina en la que todas las ruedas y transmisiones encajen entre sí con la máxima precisión.' Y la lista de actividades que August Ludwig von Schmoozer propuso en [1793, p.3]: "La forma más instructiva de enseñar política es considerar al Estado como una máquina artificial y extremadamente compleja que sirve a un determinado propósito". Este tipo de lenguaje presagia el uso de las máquinas en la metodología científica del siglo XIX, que pasamos a la siguiente.

6.2.- Los modelos dentro de la metodología científica

Del siglo XIX surgieron muchas "explicaciones" mecánicas de los fenómenos naturales. Incluyen el uso de Sigmund Freud, en [1895], de un modelo hidráulico en su boceto de una psicología (publicado en 1950) para su primera demostración de la dinámica motriz del 'aparato psíquico'. Famosamente, James Clerk Maxwell sugirió varios dispositivos mecánicos para explicar el comportamiento aparente de la radiación electromagnética. Exactamente lo que Maxwell construyó, y lo que estaba puramente en su cabeza no siempre es fácil de establecer; pero algunos de sus primeros trabajos con modelos de gelatina pueden haber valido sus contribuciones a los fundamentos de la fotografía.

Sin embargo, el siglo XIX también trajo un nuevo ingrediente: los comienzos de una teoría de la explicación por análogos mecánicos. El propio Maxwell, a la edad de 24 años, introdujo el término "analogía física" en sus conferencias On Faraday's Lines of Forces 1855–6:

> Por analogía física me refiero a que la similitud parcial entre las leyes de una ciencia y las de otra que hace que cada una de ellas ilustre el otro.

Ya en 1845 el joven físico escocés William Thomson había propuesto "el principio de las 'imágenes' como un medio para resolver algunos problemas de la distribución de la electricidad' [1890, nro 208, p.143] y enfatizó en un artículo sobre magnetismo la "analogía" entre un resultado de la inducción y un teorema de la óptica [1890, 157 f., p.104]. Casi al mismo tiempo, en 1843, Richard Owen especificó para la biología, la importante distinción entre analogía (es decir, la misma función) y la homología (es decir, el mismo origen) [Bljacher, 1982].

Las discusiones teóricas de explicación por modelos físicos continuaron a lo largo del siglo XIX, y en 1902 el físico Ludwig Boltzmann contribuyó con un artículo Modelo a la Enciclopedia Británica que resumió los logros de esta discusión [Boltzmann, 1902]. Boltzmann se concentra en el modelado científico, aunque es muy consciente del uso de modelos en el diseño y la fabricación. Cataloga los diferentes tipos de modelo según su estructura (por ejemplo, algunos son estacionarios y algunos se mueven), y describe cómo algunos de ellos dan una intuición directa de los fenómenos que representan. Señala en varios lugares que los modelos tienen "semejanza" o "similitudes" o "analogías" con lo que son modelos, pero no intenta analizar estas nociones.

Ya en 1893 el físico francés Pierre Duhem lanzó una fuerte reacción negativa contra la explicación de los modelos. En 1996 publicó su opinión de que el avance científico consiste en la construcción de teorías plenamente significativas y exactamente declaradas, cuya verdad es confirmada por el experimento. En la medida en que un modelo es algo menos que tal teoría —por ejemplo, si su conexión con el mundo es sólo una analogía— no explica el mundo. En el espíritu nacionalista de la época, Duhem añadió que los modelos mecánicos eran atractivos para los ingleses porque, apelando a la intuición, estos modelos hacían innecesarias deducciones lógicas detalladas. Por ejemplo, Lord Kelvin usó modelos porque pasan por el cálculo detallado y 'apelando sólo a la imaginación, déjelo a la imaginación para juzgar si se asemejan a lo que se supone que representan' [Duhem, 1996, p. 115]. Las opiniones de Duhem se acogieron bien a las opiniones de aquellos que, como el Círculo de Viena en las décadas de 1920 y 1930, consideraban el negocio de la ciencia como la construcción de teorías formales en el lenguaje de la lógica, junto con la derivación de hechos de estas teorías.

Durante este período no parece haber habido presión para desarrollar una teoría del modelado tecnológico.

6.3.- La filosofía de los modelos científicos

A mediados del siglo XX la noción de modelos pasó a la etapa central en la filosofía de la ciencia. Esto parece haber sido al menos en parte una reacción del Círculo de Viena. Durante los años de entreguerras, los lógicos habían desarrollado algunas teorías sofisticadas sobre cómo codificar información en sistemas lógicos de diversos tipos. El Círculo de Viena se había convertido en un foco para las aplicaciones de estas ideas en la filosofía.

Ahora los sistemas lógicos no son sólo una forma de representar la información. También desempeñan un papel en actividades diseñadas para aumentar la información. En otras palabras, tienen un papel epistemológico. Algunos representantes del Círculo de Viena fueron bastante ingenuos con respecto a este aspecto de los sistemas lógicos. Sugirieron que adquiriéramos conocimiento 'verificando' [Ayer, 1936] o 'falsificando' propuestas [Popper, 1935]. Para profundizar, varios filósofos escribieron libros y artículos sobre la cuestión de, cómo se pueden utilizar varios sistemas lógicos para aumentar nuestra comprensión.

Algunos de los sistemas lógicos pertinentes se denominaron "modelos", y varios autores se concentraron en ellos. Dos citas típicas de este período son:

> De hecho, es una gran virtud de un buen modelo que sugiere más preguntas, llevándonos más allá de los fenómenos de los que comenzamos, y nos tienta a formular hipótesis que resultan ser experimentalmente fértiles [Toulmin, 1953, p. 38].

> Ahora hay que decir algo en relación con el uso [de modelos teóricos]. Modelos teóricos ... puede utilizarse con fines de explicación, predicción, cálculo, sistematización, derivación de leyes, etc. [Achinstein, 1965, p. 106].

Dos características de esta literatura parecen datadas ahora. En primer lugar, el aumento del conocimiento o la comprensión casi siempre se tomó como teórico o científico, no tecnológico. En segundo lugar, la cuestión de lo que "sugiere más preguntas" o "nos tienta a formular hipótesis" o "puede ser utilizado para la derivación de leyes" se tomó como una pregunta filosófica, que los filósofos pueden responder pensando. Casi nadie en esa fecha pensó en buscar evidencia empírica para mostrar qué tipo de modelo de hecho, ayudan a la creatividad, y cómo lo hacen. En resumen, estos escritos eran contribuciones a la epistemología y no a la ciencia cognitiva.

Una característica común de esta literatura fue la clasificación de diferentes tipos de modelos. Por supuesto, muchos modelos están lejos de ser sistemas lógicos. Pero uno podría incorporar una amplia gama de estos modelos mediante el estudio de la "lógica" de su uso. Un ejemplo llamativo es la defensa de Mary Hesse de los modelos contra Duhem, en su folleto Modelos y analogías en la ciencia [1963]. Duhem había atacado "modelos mecánicos", que ciertamente no son sistemas lógicos. Pero para Hesse, los modelos mecánicos y otros, se utilizan como "análogos"; la última sección de su libro es un intento de construir una especie de lógica formal de analogía.

Parte de la terminología introducida en este período todavía está en uso hoy en día. Por ejemplo, un capítulo influyente de Max Black describió 'modelos matemáticos' y 'modelos teóricos' [Black, 1962, Capítulo 13, 'Modelos y Arquetipos']. En ambos casos Black describe primero cuáles son los modelos relevantes y, a continuación, dan condiciones para su uso. Un ejemplo típico de un "modelo matemático" es un conjunto de ecuaciones diseñadas para representar algún fenómeno en las ciencias sociales; Black cita dos veces la "función logística". El ejemplo de paradigma de un "modelo teórico" es la representación de Maxwell de un campo eléctrico en términos de las propiedades de un fluido incompresible imaginario. «No es necesario construir el modelo teórico; es suficiente con describirlo. [ibid, p.229]. Black también analiza los "modelos a escala" y los "modelos analógicos".

Otro tema común de la época fue la relación entre modelos y teorías. En la práctica, las dos palabras se usaban a veces indistintamente. Por ejemplo, en la revista Econometrical, Donald Davidson y Patrick Suppes [1956] se refieren en su primera página a una 'teoría formal' propuesta por Frank Ramsey, y unas pocas líneas más tarde distinguen su propio 'modelo' del de Ramsey; si pretenden alguna diferencia entre la teoría y el modelo, no lo dicen. Esto no fue un fenómeno nuevo; vimos anteriormente que en 1576 Thomas Digges describió las ideas de Copérnico como 'un nuevo Theorick o modelo del mundo'.

Una de las discusiones más detalladas sobre la relación entre modelos y teorías es Modelos, analogías y teorías de Achinstein [1964]. Achinstein proporciona una serie de pistas sobre por qué, por ejemplo, el modelo Bohr del átomo de hidrógeno se conoce como un modelo y no como una teoría, mientras que la mecánica estadística es una teoría y no un modelo. Pero apenas asume la noción de "modelo de una teoría" que los lógicos habían creado recientemente (véase la sección 7 a continuación). De hecho, para esta noción se refiere a un pasaje de Carnap [1942, pp. 203ff] que hoy podemos ver, es una mezcla bastante torpe de las nociones de una teoría y un modelo de la teoría.

Las preguntas planteadas durante este período sobre el análisis filosófico de los modelos siguen vivas hoy en día. Frigg y Hartmann dan un buen resumen de la literatura [2008]. Sin embargo, los lectores de este volumen serán conscientes de que varios escritores recientes han ocupado la cuestión del papel epistemológico del modelado en la tecnología.

6.4.- Modelos mentales

En 1983 aparecieron dos libros influyentes, tanto en ciencia cognitiva como con el título Mental Models (Gentner and Stevens [1983] y Johnson-Laird [1983]). El término "modelos mentales" era raro antes de estos dos libros, pero gracias a ellos se generalizó. Incluso cuando apareció antes de 1980, generalmente no significaba nada de ningún interés particular para un científico cognitivo. Por ejemplo, en [Gruchy, 1944, p.220] leemos acerca de los "modelos mentales o lógicos" de una economía, que deben ser "modificados en existencia concreta"; aquí la palabra "mental" sirve principalmente para distinguir estos modelos de los concretos. Se encuentra un lenguaje similar a través de las décadas de 1950 y 1960.

Es una idea muy antigua que los seres humanos dan sentido al mundo en el que viven, formando representaciones internas de las características del mundo. Durante el apogeo del conductismo, los psicólogos relegaron esta noción a las sombras. Pero a medida que el conductismo se descompuso y se hizo aceptable que los psicólogos hablaran sobre representaciones mentales, se vieron varias preguntas científicas sobre ellas. El trabajo de Tolman[1932] sobre el comportamiento de las ratas en laberintos fue un ejemplo temprano; proporcionó evidencia de que las ratas forman representaciones internas de la geometría de los laberintos, y que forman planes para negociar los laberintos. Más o menos al mismo tiempo, Piaget comenzó su serie de obras sobre la concepción del niño de ..., en la que investigó los conceptos disponibles para los niños a diferentes edades (a partir de 1929) sobre seres vivos y objetos naturales, y [1930] sobre la causalidad).

En 1943 Kenneth Craik publicó un libro en el que sugería que los seres humanos le dieran sentido al mundo formando "modelos" de él [Craik, 1943]. Se refería a algo más específico que el viejo truismo de que formamos representaciones internas. Más precisamente sugirió que el cerebro humano es una máquina de simulación de propósito general. En su opinión, un papel clave del pensamiento es predecir el futuro; el cerebro hace esto simulando la parte relevante del mundo y ejecutando la simulación. Especuló sobre qué tipo de máquina tiene el poder de llevar a cabo tales simulaciones, y propuso que el cerebro funciona manipulando símbolos (véase Craik, 1943, Ch. V: 'Hipótesis sobre la naturaleza del pensamiento'). Si hubiera sido más un científico cognitivo y menos filósofo, podría haber anticipado los "sistemas de símbolos" de Newell y Simon [1976].

En 1980 habían surgido una serie de preguntas empíricas sobre las representaciones internas del mundo. La literatura pertinente sigue siendo bastante caótica sobre cuáles son estas preguntas, y la terminología tiende a limitarse a escuelas particulares. Pero aquí siguen algunos ejemplos.

En primer lugar, la palabra «modelo» es relevante de dos maneras. Podemos discutir los "modelos" internos que las personas forman para entender el mundo; o podemos 'modelar' las formas en que la gente piensa en el mundo. Esta división de usos sale claramente en el libro de Gentner y Stevens mencionado anteriormente. En su primer párrafo Gentner y Stevens dicen 'podemos modelar la forma en que la gente imagina los líquidos moviéndose a través del tiempo ...' [1983, p. 1]. Aquí el modelo no está en la mente, es de la mente. Pero Norman comienza el primer artículo en el volumen [1983, p. 7] señalando que 'las personas forman modelos internos mentales de sí mismos y de las cosas con las que están interactuando'; estos son modelos en la mente (aunque también en parte de ella). La misma doble toma se puede rastrear a lo largo del libro. Por ejemplo, los autores de un capítulo citan un artículo con el título "Modelos de competencia en la resolución de problemas de física", y otro artículo con el título "Modelos mentales de mecanismos físicos y su adquisición". (Estos dos documentos son [Larkin et al., 1980] y [Kleer y Brown, 1981]; se citan en [Gentner y Stevens, 1983, p.97f].)

Hacer modelos de cómo la gente piensa, que a veces se conoce como 'modelado cognitivo' [Polk y Seifert, 2002]. Pero este tipo de modelo es mucho más antiguo que el nombre: testigo por ejemplo de los papeles Un modelo mecánico de los reflejos acondicionados [Baernstein y Hull, 1931] y Un modelo mecánico de los reflejos condicionados [Bennett y Ward, 1933].

En segundo lugar, si nos limitamos a los modelos internos, hay una diferencia entre esas representaciones internas de las que somos plenamente conscientes y que podemos informar sin conjeturas, y aquellas representaciones que sólo pueden ser descubiertas por el paciente y con un cuidadoso y motivado experimento. Como ejemplo de la primera, Nersessian [2002] describe el modelo de Faraday de las líneas de fuerza que rodean un imán de barra. Este modelo es tan público que los editores del volumen donde aparece el papel de Nersessian lo han puesto en su portada. En el otro extremo de la escala están los modelos mentales de Johnson-Laird y Byrne para el razonamiento lógico; estos modelos son tan esquivos que Johnson-Laird y sus compañeros de trabajo tienen que utilizar técnicas indirectas para suscitarlos. Las técnicas incluyen medir el tiempo necesario para llevar a cabo una inferencia, y el número de errores cometidos [Johnson-Laird y Byrne, 1991]. El trabajo más reciente trae evidencia de escáneres cerebrales [Knauff, 2007]. La diferencia entre público y oculto puede estar relacionada con una interesante distinción que Nersessian dibuja entre los modelos mentales que se mantienen en la memoria a largo plazo y los que son dispositivos creados en la memoria de trabajo durante la comprensión y el razonamiento [Nersessian, 2002, p. 140].

Los científicos cognitivos que trabajan en el programa de Johnson-Laird a menudo llaman ellos mismos " modelos teóricos " debido a su uso como modelos mentales. El 'Mental Models Website' de Ruth Byrne [Byrne, 2008] proporciona más información. Un ejemplo anterior de modelado mental, que fue descubierto por experimentos utilizando el tiempo necesario para resolver problemas, fue la famosa obra de Shepard y Metzler [1971], sobre la rotación de formas tridimensionales para que coincidieran.

En tercer lugar, podemos clasificar los modelos internos por el tipo de representación que utilizan. Nersessian [1984] contrasta los modelos 'proposicionales' con los modelos 'icónicos'; Stenning [2002,] aboga por una distinción conexa entre las representaciones «interpretadas indirectamente» y las «interpretadas directamente».

Luego hay preguntas sobre la disponibilidad de diferentes tipos de modelo interno, dependiendo de lo sofisticado que sea nuestra comprensión. En un nivel bajo, estas preguntas se vinculan a la teoría educativa: ¿cómo podemos enseñar mejor a los estudiantes a formar representaciones útiles? En un nivel superior tocan la ciencia cognitiva de la investigación: ¿podemos mejorar la creatividad mediante el uso de modelos de cierta manera? La publicación blurb para Young y Veen [2008] promete que el libro le ayudará a "ponerse en marcha rápidamente; estarás creando modelos mentales de inmediato'.

7 DE LOS MODELOS EDUCATIVOS A LOS MODELOS MATEMATICOS

Algunos juguetes se conocen como modelos, por ejemplo aviones modelo. Pero muchos juguetes que no son modelos, en este sentido literal, todavía pueden enseñar una cosa infantil sobre cómo funciona el mundo. A los niños les gusta jugar con juguetes y mirar fotos. Si los juguetes tienen formas que se mueven, o texturas interesantes, los niños pueden aprender algo sobre el mundo al manipularlos. Los reformadores educativos a menudo han enfatizado este aspecto de los juguetes. Por ejemplo Campanella colocado son, programa formativo para la educación en su ciudad del sol (1602 respectivamente 1623), que se basa decisivamente en el uso de modelos. La Nueva Atlántida de Bacon [1627] trae algo similar. Y, por supuesto, todos somos niños cuando necesitamos aprender algo. En cualquier nivel de investigación utilizamos copias y diagramas.

El uso de sistemas de signos y sus manipulaciones en papel en las ciencias de laboratorio de los químicos a principios del siglo XIX es descrito por Ursula Klein [1999, p. 153-164; 2003, p 2–3; ibid p.118]. Ella no las ve como representaciones, sino como herramientas productivas para abrir nuevas formas de investigación. También el historiador de la química Christoph Meinel [2004, pp. 243, 25, 270] niega que los modelos moleculares de la época ilustraran conceptos teóricos. Estaban destinados a comunicarse y enseñar.

Difícilmente podemos poner una fecha exacta en el uso de la palabra "modelo" para las herramientas educativas, porque no hay una división dura y rápida entre ellas y los tipos de modelo discutidos en las dos secciones anteriores. El modelo de un arquitecto para un edificio es una especie de versión de juguete con la que el arquitecto puede jugar, como señaló Alberti [1755, Libro II, ch. Yo, p.22]. Un modelo de trabajo de circulación de la sangre también se puede utilizar como una ayuda de enseñanza. Pero al menos a finales del siglo XIX se podían encontrar en los departamentos universitarios de Matemáticas cosas que se llamaban "modelos" y eran claramente dispositivos educativos.

Parece que estos modelos matemáticos tienen una doble ascendencia. El primero es de geometría teórica. A mediados del siglo IV A. C., Platón describió los cinco poliédricos regulares (Timaeus 54f, p. 75ff en [Plato, 1971]) y así ganó para ellos el nombre de 'Sólidos platónicos'. El decimo tercer libro de elementos de Euclides da instrucciones para construir estos poliédricos, [Euclides, 1956]; por ejemplo, su Proposición xiii.14 describe un procedimiento geométrico para inscribir un octaedro en una esfera dada. Las instrucciones de Euclides son parte de un estudio teórico del poliédrico regular que se cree que se remonta a Theaetetus a finales del siglo V A. C. (véase la Nota Histórica de Heath en la página 438f de [Euclides, 1956]); no parece haber evidencia de que los griegos lo conectaran con ningún problema de ingeniería práctica.

La segunda fuente es arquitectónica. La Alhambra en Granada (14^{o} c.) contiene magníficos ejemplos de las formas geométricas que los matemáticos las describen como 'patrones de papel pintado'; los constructores que crearon estos formularios deben haber tenido dispositivos prácticos bastante sofisticados para hacerlas. En la Europa del

Renacimiento Temprano se convirtió en una costumbre incorporar formas geométricas interesantes en los edificios, y naturalmente una teoría desarrollada para mostrar a los constructores cómo construir estas formas.

Estas dos hebras se habían unido para cuando Luca Pacioli publicó su Summa en [1994] y su De Divina Proportione ([1956], escrito en 1497 pero publicado en 1509). Pacioli da instrucciones prácticas para construir el poliédricos regular, y menciona cómo se figuran en las especulaciones filosóficas de Platón. Leonardo da Vinci contribuyó con ilustraciones a De Divina Proportione; estos incluían numerosas imágenes de figuras geométricas tridimensionales, y la primera imagen grabada de un icosaedro. Olschki comenta sobre el trabajo de Pacioli que 'El tratamiento del material, como piedra y mármol, con fines estructurales y escultóricos de acuerdo con los principios matemáticos del tiempo requiere una determinación precisa del volumen y la información fiable para la transformación de un cuerpo en otro. Los tiempos de tratamiento de los materiales a los ojos se habían ido definitivamente', [1918, I, p. 218].

Alrededor de 1860 un número de matemáticos, entre ellos Julius Plucker y Ernst Eduard Kummer, comenzaron a hacer modelos tridimensionales de complicadas curvas y superficies matemáticas y geométricas [Fink, 1890]. Herbert Mehrtens menciona que Plucker tuvo la idea de trabajar con modelos de Faraday, y que el físico Gustav Magnus ya había preparado un modelo de una superficie de onda ya en 1840, [Mehrtens, 2004, p.291-292].

En tres dimensiones, podemos modelar una forma sólida haciendo un objeto que tenga esta forma. Podemos modelar una superficie bidimensional haciendo un objeto cuya superficie es esta superficie. La geometría de las superficies hizo grandes avances a finales del siglo XIX, y los modelos fueron útiles para informarlas. Las superficies se definieron mediante ecuaciones algebraicas, pero se podrían comprobar algunas propiedades directamente desde el modelo, por ejemplo, si la superficie se gobierna (es decir, se puede generar moviendo una línea recta a través del espacio).

Pero los geómetras del siglo XIX también descubrieron algunos monstruos. Había superficies bidimensionales que podrían ser descritas algebraicamente pero no construidas en espacio tridimensional; el primer ejemplo que se descubrió fue el plano hiperbólico no euclidiano. Más tarde en el siglo, Poincaré comenzó el estudio de la clasificación topológica de superficies; en esta clasificación se ignoran la longitud y los paralelos, pero no se permite que se rompan o peguen superficies. Dos monstruos aquí eran el verdadero avión proyectivo y la botella de Klein. Ninguno de ellos se puede modelar como la superficie de un objeto en un espacio tridimensional. Estos monstruos eran un verdadero desafío para los constructores de modelos. Lewis Carroll enseñó a los niños a hacer un plano proyectivo real cosiendo juntos tres pañuelos cuadrados, [1996, Ch. VII, p. 521ff]. En su historia la tarea no se puede completar del todo: "Voy a coser después del té", dice un personaje.

Los geómetras resolvieron su problema de modelado de una manera magnífica; las consecuencias para las nociones modernas de modelo eran fundamentales. La solución era un par de dispositivos que se podían utilizar juntos o por separado; llegaron a ser conocidos como "pseudo modelos" y "modelos abstractos".

En los pseudo modelos introducimos una distorsión sistemática y reversible de alguna característica de lo que se está modelando. Dos ejemplos tempranos y famosos son los modelos de Poincaré del plano hiperbólico, conocido hoy como el modelo de círculo y el modelo de medio plano. En ambos modelos, la distancia entre dos puntos x e y en el plano hiperbólico no es la distancia euclidiana normal entre x e y en el círculo o medio plano, sino una distancia que depende de x e y por una fórmula sutil (que reapareció poco después en relatividad especial). Por ejemplo, en el modelo de círculo el efecto de esta distorsión es que el trayecto más corto entre dos puntos es de hecho un segmento de un círculo. El modelo de círculo de Poincaré se puede dibujar en la página; Como mostró el geómetra Coxeter, la imagen círculo límite III de Escher [Escher, 1992, p. 97] es una representación perfecta del modelo de círculo.

En modelos abstractos renunciamos al intento de hacer un modelo físico. En su lugar, tomamos una estructura matemática abstracta, por ejemplo el espacio euclidiano bidimensional, y damos una definición matemática del conjunto de puntos de esta estructura que forman nuestro modelo. Tanto el plano proyectivo real como la botella Klein se describen fácilmente como objetos abstractos en el espacio euclidiano de cuatro dimensiones.

El vocabulario utilizado para describir estos avances tomó algún tiempo para establecerse. Los modelos abstractos se conocían al principio como "interpretaciones"; esta terminología puede estar en deuda con el uso de la palabra por Peacock [1834] o sus fuentes francesas. La contribución de Beltrami a la geometría no euclidiana llevaba el título Saggio di interpretazione de lla geometria non-euclidiana, [1868]. A veces, la "interpretación" se traducía al alemán como 'Bild'. Durante la década de 1920 los modelos distorsionados de superficies geométricas y espacios llegaron a ser conocidos como 'pseudo espacios'. Más tarde en la década de 1920 los matemáticos en la escuela de Hilbert describen modelos abstractos distorsionados como 'pseudo modelos' o simplemente 'modelos' (Fraenkel, Von Neumann, Weyl). En 1936 Alfred Tarski dio un paso más en la generalización, y utilizó 'modelo' para significar cualquier interpretación sistemáticamente distorsionada, por ejemplo, cuando leemos 'izquierda' y 'derecha' como significado respectivamente 'derecha' e 'izquierda'. (Su contexto eran interpretaciones teóricas de las lenguas formales.)

Gottlob Frege en 1884, en una primera discusión de pseudo modelos geométricos, remarcado:

> El pensamiento conceptual solo puede, después de que una moda sacudir se sacuda el yugo [de la intuición espacial], cuando asume, digamos, un espacio de cuatro dimensiones o curvatura positiva. Estudiar tales concepciones... es dejar el terreno de la intuición por completo. [1959, n.o 14]

Frege se equivocó acerca de la curvatura positiva, la superficie de una manzana hogareña es un espacio de curvatura positiva. Pero tenía razón sobre la pérdida de la intuición. Entonces y ahora, representa un riesgo para el esfuerzo humano de estudiar estos espacios. Sea testigo de la obra maestra de John Nash sobre la incrustación de superficies en espacios de mayor dimensión [2002, pp. 151–208 y la nota en la página 209], donde se descubrió un grave error, sólo medio siglo después de la publicación del artículo. (Afortunadamente dejó intactos los resultados más citados.) El efecto depende, por supuesto, de lo bien que se sientan una sensación que tengamos para las nociones en su forma 'distorsionada'.

Durante la década de 1940 se hizo evidente para varios lógicos, que se necesitaba una noción que sería una generalización común tanto de pseudomodelos como de clases de estructuras algebraicas (como grupos) que se definen mediante sistemas de axiomas. Alrededor de 1950 dos lógicos, Alfred Tarski y Abraham Robinson (entonces estudiantes de doctorado en Londres) llegaron esencialmente a la misma generalización. Parecen haber trabajado de forma independiente; Tarski generalizó sus propios "modelos" (es decir, pseudomodelos), mientras que Robinson combinó el trabajo de Carnap [1942] con la noción de Bourbaki de una "estructura". En [1954] Tarski propuso el nombre de "teoría de modelos" para la disciplina que trataba esta nueva noción. Carnap había utilizado provisionalmente el nombre de "teoría de los sistemas" para la teoría de los modelos [1942, p.240]; Se puede especular que si la terminología de Carnap hubiera sido adoptada en lugar de la de Tarski, la teoría del modelado en la segunda mitad del siglo XX podría haberse desarrollado de manera muy diferente.

La nueva noción de modelo de Tarski era esencialmente un dispositivo lingüístico. El lenguaje llegó en tres puntos. En primer lugar, Tarski trabajó con un lenguaje formal definido matemáticamente, usando símbolos artificiales como '^' para 'y'. En segundo lugar, Tarski puso en sus lenguas formales algunas expresiones indexadoras, (ahora conocidas como "constantes no lógicas") que, cuando se aplican a una estructura adecuada, elegirían una característica particular de esa estructura. Por ejemplo, asumió que la estructura tendría una secuencia de relaciones, indexada por números naturales. Las expresiones indexadoras correspondientes en su lenguaje formal se escribirían, digamos, como R_3, pero el significado de este símbolo era esencialmente "la tercera relación de la estructura". (Otros teóricos del modelo han utilizado otras convenciones para atar las constantes no lógicas a las estructuras.) En tercer lugar, la característica central de la teoría de modelos: una estructura se definiría mediante fórmulas de teoría de conjuntos, y estas fórmulas se utilizarían para construir una definición matemática de la noción 'La frase S es verdadera en la estructura M' (es decir, la oración S se hace realidad cuando su índice en las expresiones se interpretan con referencia a la estructura M). Robinson, después de Carnap, añadió una cuarta característica lingüística: su variante de la definición de verdad de Tarski implicaba agregar los nombres de lenguaje formal para elementos individuales de las estructuras.

En resumen, la declaración de Morgan y Morrison [1999, p. 3] que 'según Alfred Tarski ... un modelo es una entidad no lingüística' es tan falso como podría ser. Probablemente la primera aparición en impresión de 'modelo' en este nuevo sentido fue el papel de Mostowski [1952], que expone los detalles sangrientos de la lingüística. Pero es cierto que se hicieron movimientos para reducir la referencia al lenguaje. Para las aplicaciones informales, se podría pasar fácilmente de ''Λ” a 'y'. También las definiciones teóricas de las estructuras podrían al menos hacerse en la teoría de conjuntos informales; Patrick Suppes [1960, 2002] recomendó esto con fuerza cuando aplicó los modelos de Tarski al modelado científico. Pero el núcleo lingüístico irreductible son las constantes no lógicas; sirven como etiquetas para ciertas características del mundo que uno quiere estudiar.

Los modelos teóricos de modelos de Tarski a menudo se conocen como modelos semánticos. Este nombre probablemente proviene de la conexión con su definición de verdad matemática anterior; había acuñado el nombre de "teoría semántica de la verdad" para su propia justificación de la misma. En [1965] John Addison publicó algunas recomendaciones para terminología y notación en teoría de modelos [1965, págs. 438–441]; las principales líneas de sus recomendaciones todavía se siguen hoy en día en la teoría de modelos matemáticos. Comentó que en la teoría

> Para modelo, se considera que un modelo es una estructura relacionada con una teoría dada, en lugar de una teoría destinada a explicar un determinado reino de fenómenos. [ibid p. 438]

Por lo tanto, para la mayoría de los teóricos del modelo, 'Estructura M es un modelo de teoría T' significa que las frases de la teoría T, cuando se interpreta como aplicable a la estructura M, son todas verdaderas. Pero algunos matemáticos también usan 'modelo' como sinónimo de 'estructura'.

En 1960 Robinson se encontró estudiando teorías donde una interpretación en particular es "intencionada", pero otras interpretaciones del mismo lenguaje formal se utilizan como un dispositivo matemático. Así que estas otras interpretaciones eran lo que antes se conocía como pseudomodelos. Pero introdujo un nuevo nombre: la interpretación prevista era el "modelo estándar" de la teoría pertinente, y los pseudomodelos eran "modelos no estándar". Su aplicación de estas nociones a los fundamentos del análisis matemático se conoce como 'análisis no estándar.

En la versión de Tarski de la teoría del modelo, cada estructura tiene un "dominio" o "universo", que es un conjunto que consiste en todos los objetos considerados. Una variación común, aunque nunca ganó la aprobación de Tarski, es permitir que una estructura tenga varios dominios. Por ejemplo, en el álgebra, podríamos considerar un espacio vectorial como una estructura con dos dominios, uno de escalares y otro de vectores. Los dominios se conocen a menudo como 'sorts'; una estructura con más de un tipo se dice que está 'muchos-ordenado', y la teoría de modelos usando varios tipos se llama "teoría de modelos de muchos clasificados". Algunas de las aplicaciones más exitosas de muchas estructuras clasificadas han sido en ciencias de la computación. La mejor aplicación se dirige a las "bases de datos relacionales" de Edgar F. Codd.

La teoría de bases de datos se refiere a representar grandes cuerpos de datos en formularios que permiten la inserción de nuevos datos y la recuperación de datos antiguos. En [1970] Edgar F. Codd introdujo uno de los estilos de base de datos más exitosos, bajo el nombre de 'modelo relacional de datos'; una base de datos que utiliza el modelo relacional se conoce hoy como una "base de datos relacional". Una base de datos relacional es, de hecho, una estructura de muchos clasificados. Un ejemplo bien conocido es una base de datos de los clientes de una empresa; esto tendrá un dominio de personas, un dominio de direcciones, un dominio de productos, un dominio de números de pedido, etc. Cada pedido tiene un número de pedido, un cliente que lo hace y un producto que se solicita; por lo que se representa como un triple pedido (número de pedido, cliente, producto).

El conjunto de todos estos triples es una relación en la estructura de la base de datos y representa el conjunto de órdenes. (Y, por supuesto, se pueden añadir más artículos, como fechas, costes, direcciones....)

Vale la pena señalar que el artículo de Codd no contiene ninguna referencia a la teoría de modelos. (Contrasta el "modelo relacional de datos" con los modelos gráficos y de red de datos; aquí "modelo" significa "forma de representación".) Aparentemente llegó a su noción combinando su experiencia de bases de datos con su conocimiento de la lógica. Las estructuras del modelo teórico resultante surgieron naturalmente de los requisitos de ingeniería. La noción de Tarski de que una estructura es un "modelo de" una frase formal también está ahí en el problema de la ingeniería: una consulta de base de datos es precisamente una frase en un lenguaje formal (el lenguaje de la base de datos), y hacer la consulta, es preguntar si la base de datos es un modelo de la Oración. Así que los idiomas son a la venta en esta aplicación también; de hecho, el documento de Codd tiene una sección titulada "Algunos aspectos lingüísticos". El lenguaje de consulta de base de datos relacional SQL se especifica mediante las normas ANSI e ISO [ISO/IEC 9075, 2003].

Tan pronto como la nueva noción de modelo semántico se puso a disposición, los filósofos de la ciencia se apresuraron a ver su relevancia para sus preocupaciones. Tarski había explicado la noción de que una teoría formal era "verdadera en" una estructura. Había una analogía obvia con la forma en que una teoría científica formal es o no es 'verdadera de' algún aspecto del mundo real. La analogía fue particularmente convincente para los filósofos que consideraban la teoría científica ideal como una teoría formal en algún lenguaje definido matemáticamente. Decir que la teoría es 'verdadera de' algún aspecto del mundo sólo significa que si asignamos ciertas características del mundo a las constantes no lógicas de la teoría, esto convierte al mundo en un modelo (en el sentido de Tarski) de la teoría. Pero también hubo un choque de terminología, porque las teorías científicas a menudo se habían considerado como una especie de "modelo" (como en la sección 6.3 supra).

Una solución popular a este choque terminológico ha sido pensar en una teoría como una posición no para un solo modelo, sino para una clase de modelo: la clase de todos sus modelos semánticos. Se puede definir esta idea limitando a la clase de modelos "físicamente relevantes". Para ciertos tipos de teoría, particularmente aquellos que consisten en sistemas de ecuaciones diferenciales, uno puede empaquetar toda una familia de modelos semánticos en un solo modelo junto con una selección de parámetros de número real. Algunas de las opciones se estudian en Suppe [1989], Kuipers[2001] y Niiniluoto [1999]; de ellos, Kuipers tiene más que decir sobre el uso de teorías y modelos en la tecnología. Suppes [1960] sostiene que el choque de terminología es sólo evidente.

8.- EPILOGO

En este capítulo, hemos encuestado el desarrollo histórico de varias nociones de 'modelo'. Permítanme añadir que hasta ahora, toda la dimensión histórica del uso y la construcción de modelos no ha recibido mucha atención. Una rara excepción es Roland Müller [1983;2000;2004]. Otros autores describen sólo partes de la historia de los significados seleccionados de 'modelo'. Esto no es sorprendente, ya que no hay un acuerdo general de que la palabra "modelo" capture un único fenómeno unificado. Pero espero haber demostrado que los usos de la palabra a través de la historia tienen cierta coherencia.

CAPITULO III

MODELAJE FUNCIONAL Y MODELOS MATEMATICOS: UN ANALISIS SEMÁNTICO

Por Wilfrid Hodges

Nos describimos a nosotros mismos el mundo en el que vivimos, tanto cómo es y cómo nos gustaría cambiarlo. El modelado es la forma en que hacemos esto cuando queremos que nuestras descripciones sean deliberadas, públicas, precisas y ajustables; las descripciones resultantes se denominan modelos. Los seres humanos se interesan por un gran número de aspectos del mundo, y los criterios para el modelado bueno y malo varían de un campo a otro. Pero hay algunos ingredientes básicos que permanecen iguales en todo. Por ejemplo, en todos los casos debe haber alguna correlación entre las características del mundo real o planificado y las características del modelo. En este capítulo se analizarán estos ingredientes constantes. Para conocer la variedad de modelos, véase el capítulo de Mueller [este volumen].

Parece que no se ha escrito mucho sobre la semántica del modelado tecnológico, excepto en el área especializada de la ingeniería de software. (E incluso en esa área la literatura filosófica es débil. Todavía se puede conocer filósofos que creen que la informática se trata de máquinas Turing.)

1 Acerca de la semántica

Este capítulo trata sobre la relación de dos lugares 'M es un modelo del sistema S'. (El sistema es cualquiera que sea el modelo. Algunas personas lo llaman el "objetivo".) Aquí está una imagen del resto de este capítulo:

Estrictamente lo que nos concierne no son los dos elementos mostrados, sino lo que se encuentra en el área en blanco entre ellos. Esta área en blanco contiene lo que sea que conecta el modelo con el sistema.

Las descripciones comunes de esta situación son que M 'representa' S, y que M 'da información sobre' S. Una semántica es una persona que pregunta qué cuenta como representando y cómo se puede recuperar la información sobre S de M. Estas son las preguntas que estudiaremos.

Pero primero tenemos que despejar un poco de espacio. Hay varias otras preguntas que pueden obstruir nuestra visión de los hechos semánticos.

De qué está hecho el modelo.

Algunos modelos están hechos de papel o madera. Algunos modelos son diagramas. Algunos modelos son conjuntos de ecuaciones. Algunos modelos son programas informáticos. Algunos modelos constan de objetos del mundo real con etiquetas abstractas adjuntas.

No hay una buena razón para tratar de restringir qué tipos de objeto podrían servir como modelos. En la década de 1990 algunas preguntas sobre los nudos se resolvieron por un proceso que implicó primero modelar los nudos dentro de incrustaciones elementales entre modelos de teoría de conjuntos con grandes cardenales [Dehornoy, 1995]. Estos modelos de teoría de conjuntos están muy lejos en los márgenes ontológicos de las matemáticas; muchos matemáticos perfectamente cuerdos niegan que existan en absoluto. Afortunadamente Dehornoy fue capaz de escribir los resultados en una forma que es convincente para cualquier matemático convencional. Así que el conjunto teórico de modelos no son necesarios para probar los resultados; pero eran necesarias para descubrir las pruebas en primer lugar.

Un periódico de San Francisco entrevistó a otro teórico del conjunto, Julius Barbanel, y le preguntó: '¿Cómo descubres hechos sobre números que son tan grandes que podrían no existir?' Respondió 'Lo hago en la ducha'. Muy bien también. No podemos dejar que los ontólogos restrinjan nuestras rutas al descubrimiento. La razón por la que menciono la ontología en absoluto es que en algunos siglos pasados la intrusión de la ontología ha hecho un daño grave a la comprensión de la semántica. Confío en que estemos más allá de eso ahora, y los ontólogos de hoy no tienen ni el deseo ni el poder para inhibir la investigación semántica. Pero es prudente la vigilancia.

La intención del usuario

'Un objeto M no es un modelo de S, a menos que el creador o usuario de M pretenda que sea uno. Por lo tanto, un relato de lo que es para M ser un modelo de S debe involucrar las intenciones de la gente. Así habla un filósofo imaginario. Para ilustrar su primera frase, este filósofo podría citar la ecuación de calor:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D\,\left(\frac{d2\rho}{dx2} + \frac{d2\rho}{dy2} + \frac{d2\rho}{dz2}\right) \qquad (2)$$

Esta ecuación se utiliza para modelar cualquier número de cosas. Incluso cuando se entiende que t es el tiempo, la función (x, y, z, t) podría ser la densidad de la materia en el punto (x, y, z) en el tiempo resultante de la difusión de una sustancia introducida en el tiempo t = 0. O podría ser la densidad de probabilidad de encontrar una partícula en el punto (x, y, z) en el momento t, cuando la partícula se mueve bajo el movimiento Browniano. O podría ser la temperatura en el punto (x, y, z) en el momento resultante de la propagación del calor de un cuerpo caliente. Y así sucesivamente. La ecuación de calor es importante precisamente debido a la gran cantidad de tipos de situación que se puede utilizar para modelar.

Ahora la semántica pregunta: ¿Qué cuenta como la ecuación de calor siendo verdadera de (digamos) la temperatura en un sistema del tercer tipo anterior? La respuesta tiene que implicar cierta correlación entre el símbolo en la ecuación y la temperatura en el sistema. Pero, ¿es realmente cierto que tenemos que mencionar la intención de alguna persona para decir cuál es esta correlación? La visión del sentido común —y creo que la correcta— es que es al revés: tenemos que ser capaces de decir cuál es esta correlación para decir significativamente que alguien lo pretende.

Donde el modelo es un paso en el diseño del sistema S, se puede hacer la pregunta opuesta: ¿Es S una ejemplificación precisa del modelo M? Pero se aplica el mismo punto general: podemos describir cuál es el tipo relevante de semejanza entre S y M sin tener que referirse a nadie que pretenda ese tipo de semejanza.

Pero nuestro filósofo imaginario tenía razón en una cosa importante. La pregunta '¿Es M un modelo preciso de S?' no tiene una respuesta independiente de cualquier correlación entre las características de M y las de S. La pregunta tiene que ser corta para algo más específico, como:

Bajo la siguiente correlación entre las características de M y las características de S (... y aquí sigue una descripción de la correlación...), ¿M forma un modelo preciso de S? (3)

O

¿Existe una correlación entre las características de M y las características de S que harían de M un modelo preciso de S? (4)

Estas preguntas implican una correlación que vincula M y S. Pero no hay necesidad de que mencionen a nadie que pretenda esta correlación.

Por supuesto, hay importantes preguntas filosóficas sobre la naturaleza del significado y la referencia, y cómo se relacionan con las intenciones del orador o escritor. Pero estas preguntas pertenecen a la filosofía de la semántica; contarlos como parte de la semántica en sí y se vuelven intrusivos.

Modelos semánticos

Una de las herramientas de la semántica moderna es la noción de un modelo semántico. Esta es una noción técnica con una definición bastante precisa. Los modelos semánticos no pertenecen a la misma lista que los modelos a escala, los modelos analógicos, los modelos de diagrama, los modelos matemáticos, etc. La razón por la que se denominan "modelos" en absoluto es histórica y más bien indirecta (véase Mueller Sección 7). No tiene sentido discutirlos sin referencia a su definición. Llegaremos a eso a su debido tiempo, pero aquí hay un breve resumen de lo que son.

Alfred Tarski sentó las bases de la semántica moderna en una monografía que publicó en polaco en 1933. Hoy en día solemos referirnos a la traducción al inglés de la traducción al alemán de esta obra [Tarski, 1983].

Esta monografía de Tarski no trataba de modelos. La palabra "modelo" nunca ocurre en él. Tarski se fijó la tarea de dar una definición puramente matemática del conjunto de frases verdaderas de un lenguaje L. El lenguaje L tenía que ser ya descriptible en términos matemáticos; de hecho, requería que fuera un lenguaje formal como los utilizados por los lógicos, pero también asumió que cada frase de L tenía un significado. Por "puramente matemática" se refería a que su definición de "frase verdadera" estaba escrita en el lenguaje de la teoría de conjuntos, excepto que se le permitía utilizar una descripción de L, incluyendo una correlación entre las palabras individuales de L y sus significados. Así que vemos que las ideas de Tarski tenían que ver con los idiomas. Junto con el lenguaje objeto L, estaba el metalenguaje en el que daba su definición de "frase verdadera", y el meta -metalenguaje en el que discutía el metalenguaje.

Para aplicaciones matemáticas Tarski revisó su definición de la verdad en la década de 1950. Retiró la suposición de que las frases del lenguaje objeto ya significan algo. En su lugar, tomó un lenguaje de objetos L que contiene un conjunto de símbolos sin sentido llamados primitivos, y nos permitió elegir cualquier correlación razonable entre primitivos y significados, siempre que los significados se dan en una forma teórica que discutiremos en la

Sección 7 a continuación. Tal correlación ahora se llama generalmente una estructura, aunque en 1954 Tarski utilizó el nombre de sistema relacional. En la terminología de Tarski, una estructura A es un modelo de la frase formal T si T se convierte en una frase verdadera cuando A se utiliza para dar significados a los primitivos en T. Revisado en estos términos, la definición de verdad de Tarski a partir de la década de 1930 se convirtió en una definición de la relación 'A es un modelo de T'. Tarski propuso la teoría del modelo de nombre para el estudio de esta relación. (Véase [Tarski, 1954; Hodges, 2001] para más información.)

Las estructuras en el sentido del párrafo anterior también se denominan a veces modelos; aunque los escritores cuidadosos restringen el uso de esta palabra al contexto 'modelo de (una oración o un conjunto de oraciones)'. Existen otros nombres; por ejemplo [Van Fraassen, 1990, p. 45] las llama "estructuras relacionales". A veces se llaman interpretaciones, porque interpretan los primitivos (como veremos en la Sección 5). En el contexto de la modelización existe un peligro obvio de confundir los modelos de Tarski con otros tipos, por lo que uno se refiere a los modelos de Tarski como modelos semánticos. El nombre es un poco irónico, porque el objetivo y el logro de Tarski en su trabajo de la década de 1930 fue parafrasear todas las nociones semánticas y reemplazarlas por las de conjunto teórico. Pero tiene sentido si tenemos que considerar que Tarski estaba descubriendo las propiedades matemáticas de los significados. De hecho, el estudiante de Tarski, Richard Montague, utilizó con precisión una forma de la teoría del modelo de Tarski para crear una teoría de significados en los lenguajes naturales [Dowty et al., 1981].

Ahora debe quedar claro a la vez que casi ningún modelo en el sentido de "modelado" son estructuras (es decir, correlaciones entre primitivos y sus significados). Un ferrocarril modelo no correlaciona los primitivos y sus significados; El modelo de Bohr del átomo de hidrógeno no correlaciona los primitivos y sus significados; y así sucesivamente. Por lo tanto, casi ningún modelo en el sentido de "modelado" son modelos semánticos de nada.

Pero los modelos semánticos siguen siendo muy relevantes para el modelado, porque ayudan a llenar el espacio entre M y S en (1). El modelo M es una especie de generalización de la oración T de Tarski, y el sistema S es una especie de generalización de la estructura A de Tarski (Tenga en cuenta la inversión: en la terminología de Tarski, el modelo semántico pertenece a S y no con M! Tenemos que vivir con esto.) Este documento será principalmente sobre los tipos de generalización que se necesitan en los dos lados.

Sobre la base de esta introducción, espero que el lector me perdone por hacer algunas peticiones.

• No asuma que se puede decir nada sensato sobre los modelos semánticos sólo sobre la base de otros usos de las palabras 'modelo', 'semántico' o 'estructura'.

• La pregunta de si varios otros tipos de modelos 'son' semánticamente modelos tiene sentido sólo como una pregunta acerca de si un tipo de modelo puede en cierto sentido ser codificado en el otro. No se puede discutir esto sensatamente sin preguntar qué tipos de codificación funcionaría.

• No tiene ningún sentido en abstracto, hablar de que un modelo sea semánticamente 'isomórfico a' o 'similar' a un sistema que está siendo modelado. Una correlación entre los primitivos y sus significados no es en ningún sentido sencillo, incluso remotamente similar a un aerogenerador, por ejemplo. Lo mismo se aplica a hablar de un modelo semántico que es 'isomórfico a' un sistema que se está modelando.

Algunas teorías se pueden codificar en modelos semánticos, y algunos modelos semánticos son útiles para discutir la similitud. Pero estos puntos sólo pueden establecerse mediante un análisis cuidadoso sobre la base de las definiciones. Están mucho más allá del alcance de las reflexiones generales sobre las perspectivas epistemológicas (por ejemplo).

2 TRES EJEMPLOS ACTUALES

Será útil tener tres ejemplos de modelado en ejecución. El primer ejemplo proviene de la ciencia fundamental, no de la tecnología; la excusa para incluirlo es que es muy familiar, y también mucho más simple que la mayoría de los ejemplos de modelado tecnológico.

El peso en un resorte

Nuestro primer ejemplo es un peso suspendido en un resorte, donde el resorte se estira y luego se libera. Este ejemplo es un visitante habitual en discusiones de modelado científico. Confío en el relato de Richard Feynman en las Secciones 21.2 y 24.2 de sus Conferencias sobre Física [Feynman et al., 1963]. Un peso se suspende en una cuerda que está firmemente anclada en el extremo superior. El peso se mueve verticalmente desde la posición de equilibrio, y luego el sistema se deja para ajustar por sí solo. (Tenga en cuenta que el sistema no es sólo el muelle y el peso, sino también la situación de moverse y luego liberar el peso.) Feynman calcula que si no hay fricción, la coordenada vertical x del centro de masa del peso se moverá de acuerdo con la ecuación

$$x = A_0 \cos\omega_0 t \qquad (5)$$

$$x = Ae^{-\gamma t/2}\cos(\omega_\gamma t) \quad \text{donde} \quad \omega_\gamma^2 = \omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{4}. \qquad (6)$$

Donde A_0 es la amplitud de la oscilación y ω es la frecuencia natural del sistema. Si introducimos la fricción a través de un coeficiente resistivo constante, la ecuación para x se vuelve más complicada:

Podemos leerlas como ecuaciones en los números reales, a menos que el número de la serie de datos sea de $\Upsilon > 2\omega_0$; en este caso podemos cambiar a una fórmula diferente, o leer la ecuación en los números complejos y tomar el desplazamiento del centro de masa para ser la parte real de x. (Este es el caso donde la amortiguación de fricción impide cualquier oscilación.)

El desarrollo de las turbinas de viento

Es un área que se está llevando a un desarrollo intensivo, en respuesta al cambio climático y los aumentos previstos en el precio del petróleo [Wizelius, 2007]. Una turbina de viento típica consiste en una torre alta en la parte superior de la cual son (a) un rotor que consta de tres cuchillas fijadas a un eje central, de modo que el eje gira cuando el rotor se enfrenta al viento, (b) un generador eléctrico accionado por el eje giratorio y (c) un mecanismo de guiñada que coloca al rotor siempre de cara al viento. Por lo general, la turbina contiene uno o más engranajes que conectan el eje al generador, y algunos dispositivos de control y mantenimiento.

El primer requisito de un aerogenerador es suministrar electricidad de la manera más eficiente posible. La eficiencia depende fundamentalmente del diseño de las cuchillas del rotor. Los experimentos científicos sobre las formas de las cuchillas que se remontan a mediados del siglo XVIII. Gracias al trabajo de Albert Betz, Hans Glauert y otros a mediados del siglo XX, ahora hay una buena teoría cuantitativa del diseño del rotor. Pero las ecuaciones resultantes no se prestan a una solución fácil; la mayoría de los investigadores en este campo utilizan computadoras para generar soluciones aproximadas.

Pero hay algunos otros requisitos importantes. Sobre todo, la turbina y su torre no deben romperse. La vida útil esperada puede ser de más de dos décadas. Ráfagas repentinas de viento pondrán todas las partes del sistema bajo tensión. Una falla eléctrica puede hacer que la carga en el generador caiga repentinamente, de modo que el rotor se deforma y se rompa. (Las averías mecánicas se dieron como una razón importante cuando la compañía líder californiana de turbinas eólicas Kenetech Windpower se declaró en bancarrota en 1996.)

Otro requisito es el inicio fácil. Un rotor que es bueno para un funcionamiento eficiente puede ser más difícil de poner en movimiento. Algunos diseñadores se aseguran de que las cuchillas del rotor tengan segmentos que respondan rápidamente a los vientos ligeros, con cierta pérdida de eficiencia general.

Así que los modelos de turbinas eólicas tienden a ser complejos en varios sentidos diferentes. (a) Hay varios requisitos que deben cumplirse; entran en conflicto y hay que encontrar un equilibrio. (b) La turbina en sí es compleja, y pueden ser necesarios diferentes tipos de modelado para diferentes partes (incluso para diferentes partes de las palas del rotor). (c) El entorno en el que funciona un aerogenerador es muy variable. El flujo laminar constante de aire se comporta de manera muy diferente del flujo turbulento, y las ráfagas violentas repentinas son diferentes una vez más. (Muchas turbinas ahora tienen dispositivos que les permiten funcionar a diferentes velocidades dependiendo de las condiciones climáticas; por lo que la complejidad (c) se convierte en complejidad (b).)

Diseño de software

Este ejemplo se basa en la construcción y verificación de un programa Find en [Hoare, 1989]. Hoare comienza con una descripción del propósito del programa Find:

> ... para encontrar ese elemento de una matriz A [1 : N] cuyo valor es f-esimo en orden de magnitud; y para reorganizar la matriz de tal manera que este elemento se coloca en A[f]; y además, todos los elementos con subíndices

inferiores a f tienen valores menores [o iguales], y todos los elementos con subíndices mayores que f tienen valores mayores [o iguales]. (7)

(Las palabras entre corchetes faltan en el texto de Hoare, pero su explicación las presupone.) Por ejemplo, si la matriz

(9,5,8,2,9,9,4,5,1,3,8,6,2,6) (8)

es la entrada, y f = 8, el programa debe generar una matriz

(m,m,m,m,m,m,m,6,n,n,n,n,n,n) (9)

donde los lugares marcados m se llenan con 1,2,2,3,4,5,5 en algún orden y los lugares marcados n se llenan con 6,8,8,9,9,9 en algún orden.

Hoare construye un programa y muestra que hace el trabajo requerido. Aquí no necesitaremos los detalles, pero una descripción amplia de su enfoque le ayudará. Se nos da la matriz A y el número f. Para mayor comodidad escribimos f^* para el número que viene en la posición f-ésima si A se reorganiza en orden no decreciente; aunque la identidad de f^* no se conocerá hasta el final del procedimiento de Hoare.

Comenzamos eligiendo un número r entre 1 y N, y ponemos m = 1 y n = N para que A sea la matriz

(A[m],...,A [n]). (10)

Realizamos una operación en la matriz que tiene el siguiente efecto. Algunos números de la matriz A se pueden mover a diferentes posiciones, y el número r puede cambiarse. También se aumenta m o n se reduce, de modo que la nueva matriz (A[m],...,A [n]) es más corta que lo que llamamos (A[m],...,A [n]) antes de la operación. Se puede mostrar que después de esta operación, A[1],...,A [m-1] son todos $\leq f^*$ y A[n +1],...,A [N] son todos $\geq f^*$ para que podamos dejar estos extremos de la matriz intactos para el resto del procedimiento.

A continuación, repetimos la operación, pero en la nueva (A[m],...,A [n]) y utilizando el nuevo valor de r. Una vez más el efecto es que nos movemos alrededor de algunos números en esta matriz más corta y tal vez cambiar r, y reducimos la diferencia entre m y n. Seguimos haciendo esto hasta que m y n se encuentren. Uno de los principales propósitos de Hoare en su artículo es demostrar rigurosamente que cuando su procedimiento se detenga, se cumplirán los requisitos de (7).

Ni Feynman ni Hoare utilizan las palabras 'modelo' o 'modelado'. Pero en la siguiente sección veremos cómo sus ejemplos caen en el patrón general.

3 MODELADO FUNCIONAL VERSUS EXPLICATIVO

En una primera aproximación podemos distinguir entre (1) modelado explicativo, cuyo propósito es explicar el funcionamiento de algo que ya existe, y (2) modelado funcional, donde se hace un modelo que muestra cómo se puede construir algo para realizar un determinado Función. Es posible que desee agregar otros tipos, por ejemplo, modelado predictivo. Pero para nuestros propósitos no tiene mucho sentido distinguir entre modelos explicativos y predictivos; ambos hacen su trabajo si nos dicen correctamente cómo es el mundo.

Los ejemplos de la sección anterior ilustran estas nociones. La descripción de Feynman del peso en el resorte es inútil para decirnos cómo adjuntar un peso a una cadena, pero sí informa cómo se comportan las pesas en las cuerdas. Así que es casi puramente explicativo. (Digo 'casi' porque uno podría soñar con una situación en la que alguien necesita algo que se comporta de cierta manera, y la descripción de Feynman se utiliza para confirmar que el peso en un resorte hará lo que se requiere.)

Por el contrario, la descripción de Hoare del programa Find es puramente funcional. Nos dice lo que se supone que debe lograr el programa, pero no da ninguna información sobre cómo funciona el mundo.

El ejemplo de los aerogeneradores es más típico del modelado tecnológico. Se puede ver a la vez que implica elementos de modelado explicativo y funcional. El propósito general es funcional, a saber, diseñar una máquina que realice las funciones de un aerogenerador. Pero una buena parte del modelado en el camino será explicar cómo funciona el viento y qué efecto tiene en ciertos dispositivos mecánicos. Al igual que con todos los modelos explicativos, la pregunta surge si el sistema realmente se comporta como el modelo dice que sí. Mostrar que la respuesta es "Sí" se denomina validar el modelo.

Este no es el lugar para discutir lo que es una explicación. (Véase Pitt [este compilado].) Pero está claro que los requisitos para una explicación del comportamiento del aire en relación con las turbinas eólicas no son los mismos que los de un físico teórico. Para el ingeniero, la explicación es necesaria para asegurarse de que el aerogenerador hará su trabajo de forma fiable y no causará ningún daño. Una descripción aproximada hasta una cierta precisión estará bien para esto; el físico podría rechazarlo como simplemente incorrecto, incluso cuando se sabe que el error es pequeño.

Esto es una simplificación excesiva, por supuesto. Los físicos usan constantemente aproximaciones irreales, piensen en la polea lisa. Y si los ingenieros utilizan un método que se sabe que es lo suficientemente preciso bajo ciertas circunstancias, deben comprobar si todavía pueden usarlo cuando las circunstancias cambian. Citando [Quarton, 1998, p. 7f],

> ... El método simplificado previamente aceptado implicaba la generación de espectros de carga de fatiga de componentes a partir de las cargas medias a la velocidad nominal del viento del aerogenerador. Este enfoque, aunque sin duda conservador para ciertos componentes de un aerogenerador, ahora se reconoce como inseguro para otros, particularmente en el caso de las máquinas grandes.,

Quarton ofrece un gráfico que muestra la gran diferencia entre los resultados del cálculo simplificado y una simulación rigurosa bajo ciertas circunstancias. Tendremos que decir más sobre el uso de aproximaciones. Será útil tener en la mano una descripción de un ingrediente común de los modelos de turbinas eólicas. Este es el modelo de impulso de elemento de haz (BEM).

El modelo asume una corriente de aire que fluye a través del rotor. A cierta distancia delante del rotor, el aire tiene velocidad v; a cierta distancia detrás del rotor la velocidad ha bajado a w. La caída en la velocidad, v-w, indica la caída en la energía cinética del aire; la turbina recoge esta energía y la convierte en energía eléctrica y algo de calor. El modelo BEM predice la caída de la energía cinética del aire. Lo hace combinando dos cálculos separados. (1) El primero es el cálculo del impulso. Para ello, suponemos que la caída en la velocidad del aire se produce dentro de un disco de espesor infinitesimal, conocido como el disco del actuador, en ángulo recto con respecto a la corriente de aire entrante. El cálculo del impulso da los componentes de la fuerza en un elemento de aire dentro del disco del actuador, en términos de las velocidades v, w y la velocidad angular del rotor. (2) El segundo es el cálculo del elemento “aspa”; esto deriva ecuaciones para los componentes de fuerza en un elemento de aire dentro del disco, en términos de los coeficientes de elevación y arrastre del aspa del rotor (que se puede determinar experimentalmente). Al equiparar las expresiones para cada componente de la fuerza, llegamos a ecuaciones que relacionan v y w con las características del rotor. Dado que el modelo BEM implica varias simplificaciones, debe validarse mediante experimentos. En la práctica funciona bien para un flujo de aire relativamente estable, pero la turbulencia lo tira fuera de línea. (Véase, por ejemplo, Sørensen y Kock [1995] para un análisis y algunos datos experimentales)

Incluso dentro de un único modelo puede no tener sentido distinguir entre los componentes funcionales y los componentes explicativos. Tomemos por ejemplo el siguiente comentario sobre la gestión de la pesca:

> El gerente puede ver el problema desde un punto de vista ecológico (administrador ecológicamente ilustrado), que considera las consecuencias de la cosecha en el tamaño de la población de peces, pero no asume que los peces evolucionarán a un nuevo tamaño adulto. O el gerente puede mirar el problema desde un punto de vista evolutivo (gerente evolutivamente ilustrado), que considera las consecuencias ecológicas y evolutivas de la cosecha. ([Vincent and Brown, 2005, p. 353]) (11)

Podría suceder lo siguiente. Nuestro gerente ecológicamente ilustrado construye un modelo y alimenta en él algunos valores de parámetros que describen una cierta especie de peces; otras partes del modelo describen los efectos de la intervención humana y se utilizan para guiar la política. Luego, su colega evolutivamente ilustrado toma el control del modelo y añade un componente que predice cómo las características de la especie evolucionan bajo la presión del entorno planeado; en este modelo la forma de la especie deja de ser un dato y se convierte en parte de lo que está planeado.

Cuando el modelado se utiliza con fines de planificación social o ambiental, debemos esperar que a veces los parámetros de un modelo se establezcan en valores actuales, o que se utilicen para describir el estado que queremos lograr. Algunos valores de parámetros posibles solo lo serán por productos del modelo, valores que no podríamos lograr o que nunca querríamos.

El modelado funcional a menudo tiene lugar en un entorno comercial. El cliente quiere un sistema para algún propósito. El modelador y el cliente acuerdan una descripción (llamada especificación) de lo que el sistema está destinado a hacer. A menudo hay muchas etapas de refinamiento antes de implementar la especificación (es decir, se convierte en un sistema). Pero el modelado funcional también puede ser impulsado puramente por la investigación.

4.- IMAGEN O TEXTO

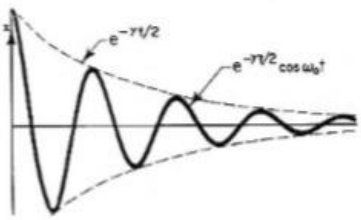
Volvemos a nuestro diagrama (1) y la pregunta de cómo el modelo M está conectado al sistema S.

El peso en un muelle de Feynman es un lugar conveniente para comenzar. En los tres ejemplos siguientes, S es un peso en un muelle, ya sea uno real o uno que proponemos construir. Pero la conexión toma una forma diferente en cada ejemplo.

(A) El modelo es una maqueta informática en realidad virtual. Parece la cosa real, y tal vez suena como la cosa real si el programador se estaba divirtiendo. En este caso, la conexión con el sistema es semejante o similar; decimos que el modelo es pictórico.

En el modelado funcional, el modelador a veces convertirá una etapa temprana de la especificación en un sistema de trabajo de juguetes, llamado prototipo. El prototipo es un modelo pictórico del sistema final. Muestra cómo funcionará el sistema final, trabajando más o menos como el sistema final, pero tal vez con algunas características que faltan.

(B) El modelo es un gráfico, por ejemplo [Feynman et al., 1963, p. 24-3]:



(12)

Este gráfico describe el sistema menos directamente. De izquierda a derecha en el gráfico representa el tiempo, arriba y abajo representa la distancia vertical del centro de masa del peso desde su posición de reposo. En ambas dimensiones, una distancia en el gráfico es proporcional a una distancia en el espacio o el tiempo. Un modelo que se puede leer de esta manera, tomando algunas dimensiones en el modelo como correspondientes a algunas dimensiones en el sistema, se denomina modelo analógico.

En ingeniería hidráulica y aeronáutica uno a menudo se encuentra con modelos a escala. Se trata de modelos analógicos en los que las dimensiones del sistema final se escalan o bajan con precisión (normalmente hacia abajo) para que el modelo tenga un tamaño más conveniente que el sistema final. Pero si todas las dimensiones se escalan hacia abajo en una relación r, entonces las áreas se escalan en relación r_2 y los volúmenes (y por lo tanto los pesos) en relación r_3. Así que dadas las leyes de la física, ¿cómo debemos escalar el tiempo si queremos que el comportamiento del modelo prediga el comportamiento del sistema? El análisis dimensional responde a esta pregunta (véase el capítulo 6 de esta compilación).

Un modelo puede ser tanto pictórico como analógico. Por ejemplo, el modelo del arquitecto es ambos. Pero el modelo en (12) claramente no es un modelo pictórico; no se parece en nada a un peso en un resorte.

(C) El propio Feynman modela su sistema con una ecuación, (6). Su ecuación es un fragmento de texto que hace una declaración sobre el sistema. Lo llamamos un modelo textual.

Algunos campos han desarrollado anotaciones especializadas para su materia. Generalmente estas anotaciones son textuales, en el sentido de que construyen expresiones a partir de un alfabeto finito, aunque puede haber razones pictóricas por las que se eligió un símbolo en lugar de otro. A menudo están destinados a ser escritos y leídos en lugar de hablar. Las partituras musicales son un ejemplo obvio. No hay ningún problema inherente acerca de traducir la partitura de un símbolo de sonata para piano de Beethoven por símbolo al inglés ('La firma de tiempo es el tiempo común, la primera barra comienza con un mínimo en g en la mano derecha ...') de tal manera que la partitura original podría recuperarse de los ingleses, aunque no puedo pensar por qué alguien querría hacerlo. El modelo analógico (12) no se traduce de ninguna manera similar.

Otro ejemplo de notación textual es Universal Modelling Language (UML), que a menudo se utiliza en las primeras etapas del modelado de software; es menos especialista que las partituras musicales, pero sigue siendo muy limitado en lo que puede expresar.

La notación de diagrama del software lógico de Barwise y Etchemendy Hyperproof [Barwise y Etchemendy, 1994] se ve pictórica, pero se puede leer como textual. La parte superior de la pantalla lleva imágenes de un tablero de ajedrez con varios objetos dispuestos en él, mientras que la parte inferior lleva fórmulas lógicas convencionales. Las reglas integradas (Observar y Aplicar) llevan información de imágenes a fórmulas y de fórmulas a imágenes. Aunque podemos decir en fórmulas cualquier cosa que podamos decir en imágenes, y en cierta medida viceversa, los dos tipos de representación fomentan diferentes hábitos de razonamiento. Keith Stenning [Stenning, 2002] informa de algunos experimentos valiosos sobre cómo los estudiantes con diferentes estilos cognitivos utilizan la prueba Hyper. Su Capítulo Dos examina diferentes formas de representación desde un punto de vista cognitivo. (Véase también el capítulo 5 de esta compilación sobre el razonamiento basado en modelos.)

Los modelos textuales son particularmente importantes para nosotros porque en principio el análisis semántico de Tarski se aplica a ellos. El propio Tarski dijo ([Tarski, 1984, p.267):

> Quien siempre desea... para perseguir la semántica del lenguaje coloquial con la ayuda de métodos exactos se llevará primero a emprender la tarea de agradecer menos de una reforma de este idioma. ... Sin embargo, cabe dudar de si el lenguaje de la vida cotidiana, después de ser «racionalizado» de esta manera, seguiría conservando su naturalidad y si no preferiría asumir los rasgos característicos de las lenguas formalizadas.

Tarski puede haber pretendido que estas observaciones disuadieran a la gente de extender su teoría semántica más allá del caso de las lenguas formalizadas. Pero hoy en día su teoría se aplica muy generalmente, y la "racionalización" a la que se refiere se toma como parte del trabajo de una semántica. Por ejemplo, los diagramas de Barwise y Etchemendy (arriba) se estudian con este espíritu.

Muchos modelos son texto desde el principio, o se pueden leer como texto. Un caso importante que tenemos que considerar son los modelos informáticos. Por ejemplo, los modelos de turbinas eólicas se presentan generalmente como programas informáticos junto con alguna teoría adjunta para justificar los programas. Para el análisis semántico necesitamos ser más precisos sobre exactamente qué característica de un modelo de computadora es el modelo real. Permítanme dar mi propia respuesta; otros analistas pueden ver las cosas de manera diferente.

La información sobre el aerogenerador propuesto se obtener mediante la ejecución del programa. Así que debemos contar el modelo como la salida del programa. La salida puede incluir texto impreso en la pantalla o guardado en un archivo; en este sentido, el modelo es textual. La salida también puede consistir en imágenes en la pantalla, o gráficos; en este sentido, el modelo es pictórico, y posiblemente también analógico. Las simulaciones dinámicas en tiempo real son ciertamente analógicas; pueden incluir sonido, así como gráficos.

A menudo el mismo programa se puede ejecutar con diferentes parámetros. (Por ejemplo, en el modelado de turbinas eólicas se utilizan programas que simulan las condiciones del viento y se siembran con un número aleatorio. A efectos prácticos, se puede considerar que estos programas permiten infinitamente muchos valores de parámetros.) Sólo unas pocas de estas carreras tendrán lugar; el resto son salidas virtuales. Así que tenemos que permitir que un modelo textual pueda consistir en texto virtual, o tal vez mejor, puede consistir en una familia de diferentes textos virtuales.

En esta lectura, el programa informático en sí no es el modelo; es un dispositivo para generar el modelo. También la teoría de fondo que apoya el programa no es el modelo, aunque a menudo contiene modelos explicativos de otras cosas.

El ejemplo de Feynman lanza otro objeto que debemos notar. Esta es la función f que, para los números reales A, γ, t, ω_γ

$$f(A,\gamma,t,\omega_\gamma) = Ae^{-\gamma t/2}\cos\omega_\gamma t. \tag{13}$$

Esta función es un objeto abstracto. Para la definición, algunas personas le dan una forma teórica identificándola con un conjunto de 5 tuplas ordenadas de números reales. Aunque la función claramente tiene alguna relación cercana con la ecuación (6), es un tipo de objeto totalmente diferente. No podemos ponerlo en una página o una pantalla, o hacerlo de madera o yeso de París. En resumen, no es 'accesible' para nosotros de ninguna manera directa. Sólo podemos tener cualquier relación cognitiva con ella a través de alguna descripción de la misma, por ejemplo, la ecuación (6). Por esta razón creo que deberíamos dudar en llamar a la función un "modelo" del sistema de peso de resorte. (Más tarde veremos que está más cerca de un modelo semántico, aunque tampoco es eso.) Tampoco debemos confundir las funciones en este sentido con la 'función' de un artefacto como en el modelado funcional.

5.- PRIMITIVAS E INTERPRETACIONES

Para conectar con el sistema, el texto de un modelo tiene que contener algunas expresiones que hacen referencia a las características del sistema. Por ejemplo, una descripción de un sistema de peso - resorte puede contener una frase.

El peso (14)

No se menciona ningún peso específico. Pero cuando un sistema en particular está en discusión, por defecto esta frase (14) se refiere al peso en el sistema. O considere el símbolo A en el ejemplo de Feynman (6). Para adjuntar la ecuación al sistema, necesitamos tomar A como la medición del desplazamiento vertical del peso en el tiempo t = 0; pero no hay nada en el símbolo que nos diga esto. A lo sumo puede haber una convención de que un símbolo en esta posición se refiere a un número real o complejo.

Si un fragmento de texto contiene una palabra o símbolo que necesita interpretación antes de que podamos decir que el texto hace una declaración verdadera o falsa, entonces (como en la Sección 1 anterior) decimos que la palabra o símbolo es una primitiva. El nombre proviene del ensayo del siglo XVII [Pascal, 1963, p. 350], pero con un giro curioso. Según Pascal, no necesitamos dar los significados de nuestros primitivos, porque todo el mundo ya sabe lo que quiere decir. En la terminología actual, no damos significados permanentes para nuestros primitivos porque no tienen ninguno; pero necesitamos explicar a qué se refieren en cualquier aplicación. Otro nombre para primitivos en la literatura lógica es constante no lógica. Los lingüistas a veces llaman a nuestros primitivos, indexados porque el usuario necesita indicar a lo que se refieren (por ejemplo, señalando con el dedo índice).

Así que un ingrediente del modelado es configurar una correlación entre ciertos símbolos o expresiones (los primitivos) y ciertas características del sistema. Una correlación que hace esto se denomina interpretación. Veremos en la Sección 7 (y ya lo mencionamos en la Sección 1) que una estructura (en el sentido de la teoría del modelo) es una especie de interpretación. Mientras tanto, examinaremos en esta sección lo que se debe hacer al sistema para extraer las características pertinentes.

El sistema en sí casi nunca nos dice dónde y cómo conectar a los primitivos; el ejemplo de "el peso" en (14) fue inusualmente sencillo. Un aspecto extremadamente importante del modelado es que, a menudo se necesitan adjuntar primitivos a cosas que podrían considerarse no partes del sistema en absoluto. Aquí sigue cuatro tipos de ejemplo.

Sistemas de coordenadas. El símbolo A en (6) significa un número real (o posiblemente un número complejo, como explica Feynman). El sistema de peso de resorte en particular S, no viene con números reales adjuntos. Para relacionar A con el sistema necesitamos poner el sistema en un sistema de coordenadas espaciales.

El caso del tiempo es un poco diferente. El símbolo t en (6) no es primitivo; no está destinado a referirse a un momento determinado de tiempo. Más bien (6) dice (en la lectura prevista de la misma) que una cierta ecuación se mantiene para todos los valores de t en algún rango que se suministrarán. No hay ninguna expresión en (6) que haga referencia a este intervalo. Pero para dar sentido a (6) tenemos que suponer que hay una referencia tácita a la gama; si lo desea, (6) es la abreviatura de otro fragmento de texto más explícito, por ejemplo

$$x(t)=Ae^{-\gamma t/2}\cos(\omega_\gamma t) \text{ (para todo } t \in J) \qquad (15)$$

donde $\omega_\gamma^2 = \omega_0^2 - \gamma^2/4$.

Aquí el símbolo J es un primitivo que debe interpretarse como referencia a un intervalo en el campo R de números reales. Para conectar J al sistema, necesitamos especificar este intervalo como el conjunto de valores en un cierto intervalo de tiempo medido en una escala de tiempo dada.

El símbolo x debe interpretarse en el sentido de que se refiere al desplazamiento vertical del peso en el tiempo t, donde tanto el desplazamiento como el tiempo se miden en las escalas que acabamos de mencionar. Por cierto, me tomé la libertad de hacer la dependencia de x en t explícito en (15).

En una lectura posible, cuando usamos (6) como modelo de un sistema de peso primaveral, no necesitamos considerarlo como referencia implícita o explícitamente a cualquier sistema de coordenadas. En su lugar, podemos leerlo como diciendo 'Hay un sistema de coordenadas A tal que ϕ(A)'.. Bueno, sí, esta es una posible lectura. Pero hago dos observaciones al respecto. En primer lugar, la lectura está vacía a menos que se diga o implique algo sobre qué sistemas de coordenadas contaría. No desea utilizar una escala logarítmica para el tiempo, por ejemplo. Y en segundo lugar, los lógicos notarán que para explicar lo que significa decir 'Hay un sistema de coordenadas A tal que, ϕ(A)', primero necesitamos una explicación de lo que significa decir ϕ(A)'. Así que esta lectura cuantificada de (6) no es una manera muy eficaz de barrer los sistemas de coordenadas bajo el tapete.

Es importante tener en cuenta que las coordenadas a las que se hace referencia en un modelo, no necesitan ser coordenadas de espacio-tiempo. Para modelar las vibraciones de un sistema mecánico complejo, como por ejemplo un aerogenerador, puede ser conveniente aplicar una transformación de Fourier para que una dimensión represente la frecuencia y otra represente potencia. (Entonces se dice que el modelo está en el dominio de frecuencia.)

Observable versus teórico. A veces, un modelo contiene primitivos explícitos que hacen referencia a cosas que no se pueden leer desde el sistema. El ejemplo de Feynman es demasiado simple para ilustrar esto de manera convincente. Pero, por ejemplo, se sabe que la constante A es igual a $\sqrt{2T/k}$ donde T es la energía inicial del sistema y k es la constante del resorte. Los valores de x se pueden observar midiendo con una regla (y recordando que el sistema modelado incluye el desplazamiento inicial del peso). Pero se podría argumentar que sólo podemos descubrir la energía inicial del sistema haciendo algunas otras mediciones y asumiendo que la fórmula A = $\sqrt{2T/k}$ retiene, por lo que no se observa estrictamente T desde el sistema. En una terminología que a veces se utiliza en la filosofía de la ciencia, la función x en (15) es observable, mientras que T es teórica.

No conozco ningún ejemplo de elementos teóricos en modelado puramente funcional; pero no hay razón por la que no deban existir. Ciertamente se pueden encontrar en las partes explicativas del modelado funcional. El disco actuador en el modelo BEM (Sección 3 anterior) es un claro ejemplo; objetos infinitesimales son teóricos casi por definición. En muchos casos (que van desde la mecánica estadística hasta la teoría de las elecciones) el uso del infinito es una conveniencia y en principio se sabe cómo eliminarlo. Hay algunas indicaciones de que el uso del disco actuador en el modelo BEM no es de este tipo, y contiene suposiciones físicas significativas y falsas. Volvemos a esto en la siguiente sección.

Nancy Cartwright ([1999] passim) ataca la distinción observable/teórica. Algunas cantidades físicas que supuestamente son medibles muy a menudo no lo son. Por ejemplo, en un universo newtoniano, una partícula puede ser actuada simultáneamente por la presión y por las fuerzas gravitacionales y electrostáticas. Podemos tener teorías que nos digan los valores de estas fuerzas. Pero lo que realmente vemos es el movimiento producido por el resultado de las fuerzas, y no hay manera de separar los componentes para la inspección sin hacer cambios importantes en la configuración física. Parece que el punto de Cartwright se aplica igualmente al modelado funcional de los mecanismos físicos. Por ejemplo, no hay perspectiva de deducir el movimiento del aire del aerogenerador por sí solo; la introducción de otras pruebas de velocidad y dirección del viento interferirá con el funcionamiento de la turbina.

Características externas frente a internas. A veces los modeladores funcionales hacen una distinción similar a la que se parece entre observable y teórico.

> Análisis funcional externo (o el análisis funcional de la necesidad), enumera los servicios que el producto debe proporcionar independientemente de los medios de que disponga para prestarlos. ... El análisis funcional interno (o análisis técnico funcional) nos permite analizar los recursos necesarios y la forma en que se asignan para prestar el servicio requerido. [Prudhomme et al., 2003] (16)

Pero la base de la distinción externa/interna es muy diferente de la distinción observable/teórica en la filosofía de la ciencia. Las características internas del sistema construido realmente están allí y deben haber sido observadas por la persona que lo construyó. En más consideraciones físicas de ingeniería, hay un montón de ejemplos de sistemas con características funcionales 'internas' que todo el mundo puede ver: por ejemplo, las cajas de pistón en un motor de vapor (a menos que piense que los motores de vapor fueron construidos por el placer de los observadores de trenes).

Objeto contra comportamiento. En el ejemplo de Hoare, el sistema a construir es una pieza de software en algún lenguaje de programación. Pero la descripción inicial (7) no dijo nada sobre el software; dijo lo que el software se supone que debe lograr. El propio Hoare presenta una serie de refinamientos de esta descripción, que se acercan cada vez más a una pieza de software, pero en cada etapa todavía está describiendo el comportamiento del software. Ahora el software en sí mismo en un sentido describe su propio comportamiento; te dice lo que sucederá cuando se ejecute. Así que podemos pensar en el software como una versión más refinada del modelo; ambos son descripciones del mismo comportamiento previsto.

Esto aumenta la posibilidad de construir el software S a partir de la especificación M mediante operaciones textuales. ¿Qué tipo de refinamiento se necesita para convertir M en S? La razón por la que M no funcionará como está, es que el ordenador no puede leerlo. Las descripciones no son las que el equipo puede leer como instrucciones. Para convertirlos en instrucciones, necesitamos hacer la descripción más concreta, y necesitamos incluir descripciones de las estructuras de datos que el equipo necesitará para el cálculo. (Estas estructuras de datos son entidades internas definidas anteriormente.)

Los científicos informáticos han elaborado la metodología requerida con gran detalle; ver por ejemplo [De Roever y Engelhardt, 1998]. A partir de la especificación inicial (que podría formar la base de un contrato con el cliente), el desarrollador de software reescribe el texto varias veces, cada vez haciéndolo más específico. Este proceso se conoce a veces como refinamiento escalonado. El trabajo de Hoare ayudó a encontrar la metodología de este proceso. Para una semántica, el proceso es interesante debido al papel directo que la semántica desempeña en la propia tarea de ingeniería.

6 VERDAD Y SUS ALTERNATIVAS

Supongamos que el modelador ha informado incorrectamente del mundo, o el implementador no pudo copiar el modelo correctamente. En este punto, la semántica de Tarski se activa para decirnos qué características de la interpretación son necesarias para definir si el modelo hace una declaración verdadera.

La respuesta es una estructura. Pero antes de llegar a eso en la siguiente sección a continuación, notamos que en la práctica a menudo tenemos que poner algunas reservas sobre la noción de verdad. Estas reservas son un desafío para la semántica: ¿significan que parte del relato de Tarski tiene que ser abandonado o generalizado? Hay dos casos a considerar.

Caso Uno: Basta con una aproximación.

La primera y más obvia reserva es que los objetos físicos tienen bordes ásperos. Concedido, a veces podemos ser extraordinariamente precisos. Comentarios de Feynman (sobre un valor experimental para la constante de Dirac):

> Si usted fuera a medir la distancia de Los Angeles a Nueva York a esta precisión, sería exacto al grosor de un cabello humano. Así es como se ha comprobado delicadamente la electrodinámica cuántica, en los últimos cincuenta años, tanto teórica como experimentalmente. [Feynman, 1990, p. 7] (17)

Pero todavía hay una zona gris, aunque pequeña. Con el mejor equipo de medición no hay acción física que constituya poner dos cargas de punto a una distancia de exactamente un centímetro. Por lo tanto, no hay una separación precisa entre la verdad y la falsedad de la declaración 'Estas dos cargas están a una distancia de un centímetro'. Este problema afecta tanto al modelado explicativo como al funcional cuando los sistemas contienen objetos físicos.

El escenario puede cambiar cuando nos movemos a sistemas menos físicos. Si nuestro sistema es software, entonces podemos hacer declaraciones sobre su comportamiento que son absolutamente verdaderas o absolutamente falsas, sin un punto medio en absoluto. En principio lo mismo se aplica a cualquier sistema que permita una descripción digital, por ejemplo, una grabación digital de una pieza de música. Por el contrario Ramsey en su ensayo basando la probabilidad en creencias subjetivas comentarios:

> No he resuelto la lógica matemática de esto en detalle, porque esto sería, creo, más bien como trabajar un resultado de siete lugares de decimales, sólo válido para dos. [Ramsey, 1978, p.82] (18)

Los medidores psicológicos a menudo tienden a estar contentos con límites vagos. En la práctica, a menudo hay una solución razonable a la vaguedad de los límites: elegimos un grado de inexactitud que estamos dispuestos a tolerar, y contamos una descripción como verdadera si es cierta dentro de ese grado de inexactitud. Este enfoque nos permite ignorar la diferencia entre dos tipos diferentes de error: obtener un número preciso incorrecto y poner un número preciso en una cantidad que no tiene un valor preciso.

Por otro lado, puede ser un asunto no trivial saber si un modelo se ajusta a los hechos dentro de la tolerancia permitida. Un ejemplo es determinar el tamaño de las diversas correcciones relativistas necesarias para calcular la posición en un sistema de navegación por satélite. Resultan ser tan grandes que un sistema que usa la física newtoniana sería completamente inaceptable para muchos propósitos prácticos. (Véase [Ashby, 2003] para este ejemplo, Sección 4 de Suppes [esta compilación] para errores en la medición, y [Taylor, 1997] para el análisis de errores en general.)

Este caso añade una complicación a la semántica de Tarski, pero nada más. En lugar de examinar la verdad de declaraciones como 'El poder generado es 500kW', examinamos la verdad de declaraciones como 'El poder generado está dentro de 500kW' donde es un número pequeño fijo. Esto complica el lenguaje del objeto, pero estamos de vuelta en una situación en la que la verdad gobierna: un modelo explicativo pretende decir algo verdadero, un modelo funcional nos invita a hacerlo realidad.

Caso dos: Falso, pero no nos importa.

A veces aceptamos un par modelo/sistema donde el modelo da una descripción ciertamente falsa del sistema, pero no nos importa. Esto puede suceder tanto con modelado explicativo como con funcional, cuando hacemos una suposición que simplifica los cálculos pero se sabe que es incorrecto.

Las suposiciones incorrectas pueden ser globales, pero a menudo un modelo divide el sistema en varios componentes y hace diferentes suposiciones simplificadas en los diferentes componentes. Un ejemplo bastante sencillo de esto es el manejo de Prandtl del flujo de fluidos separando una capa límite delgada y suponiendo que la fricción opera a lo largo de la capa límite, pero en ningún otro lugar; véase [Morrison, 1999, p. 53ff]. La afirmación de que el flujo de un fluido se divide en dos partes, en las que se aplican leyes diferentes, es simplemente falsa; lo permitimos porque la teoría resultante es manejable computacionalmente y conduce a valores numéricos que están cerca de los valores observados.

Aparece un ejemplo más sutil en el modelo BEM para turbinas eólicas. Aquí los componentes son conceptuales, no físicos. Recuerde que la teoría del impulso produce ecuaciones que relacionan la fuerza F en los elementos del aire en el disco del actuador con las velocidades de aire V antes y detrás del rotor, y la teoría de elementos de aspa produce ecuaciones que relacionan F con las características del aspa C. Relacionamos V con C resolviendo simultáneamente estas ecuaciones. Las suposiciones simplificadoras hechas en la teoría del impulso son diferentes de las de la teoría de elementos del aspa; por ejemplo, la teoría de elementos del aspa supone que los coeficientes de elevación y arrastre determinan las fuerzas en los elementos del aspa. A diferencia del ejemplo Prandtl, no hay separación espacio-tiempo de los componentes donde se aplica la teoría del impulso y aquellos donde se aplica la teoría de elementos del aspa. Pero las cosas no son realmente tan diferentes: las dos teorías describen diferentes objetos en el espacio FxVxC.

Van Kuik [2003] proporciona algunas pruebas de que las suposiciones en el disco del actuador en la teoría del impulso contienen falsedades físicas. Aplicar argumentos físicos a singularidades es delicado en el mejor de los momentos, y Van Kuik muestra que en este caso conduce a resultados incompatibles, algunos de los cuales son falsificados por experimento. Concluye con una pregunta abierta: "¿Cuál es el origen de la incoherencia y qué cambios se requieren en la modelización del equilibrio de impulso para eliminarlo?". Gracias al análisis no estándar sabemos que la noción de un disco infinitesimal no es inconsistente en sí misma, al menos si se maneja correctamente. Pero el problema es realmente encontrar una forma físicamente bien motivada de usar el disco para alcanzar resultados que estén de acuerdo con el experimento en condiciones razonables.

La mayoría de los casos de falsedad de "no importa" también son casos en los que las aproximaciones son lo suficientemente buenas. Adoptamos supuestos falsos pero simplificadores; la falsedad de las suposiciones afecta a los resultados, pero sólo en un grado que podemos tolerar. El ejemplo más cercano que conozco a un ejemplo puro de falsedad de "no te importa" es casi cualquier compilador para el lenguaje de programación Prolog. Los requisitos de un compilador son lo suficientemente precisos. Pero los diseñadores de los compiladores de Prolog a menudo ignoran uno de estos requisitos, porque implementarlo con precisión ralentizaría el funcionamiento del software compilado en un grado inaceptable. El requisito es comprobar que ciertas variables no se producen en ciertos términos: la "comprobación de ocurrencia". Se sabe que el software con una comprobación de ocurrencia defectuoso funciona correctamente la mayor parte del tiempo, y los programadores de Prolog desarrollan una idea de qué evitar si quieren mantenerse alejados de los problemas con él. (Véase [Apt y Pellegrini, 1994].)

Es imposible enumerar de antemano las formas en que los modeladores pueden encontrar justificación para usar modelos que no son descripciones precisas de sus sistemas. En 1430 el modelo del arquitecto del Domo de Florencia fue destruido por su "deshonestidad" (inhonestas), ¿qué pueden haber significado? Una especie de deslizamiento que nunca hubiera previsto aparece en un artículo reciente de Klaus Oberauer que compara cuatro teorías psicológicas de cómo la gente interpreta las sentencias condicionales. Oberauer traduce las cuatro teorías "en modelos formales" que contienen algunas características que los autores de las teorías casi con toda seguridad recrearían, y comenta:

> La suposición [de que los procesos se ejecutan por la misma ruta ...] no es exigida por las teorías o por ningún dato, pero es necesario mantener el número de parámetros libres en los modelos menor que el número de puntos de datos que se van a instalar ... [Oberauer, 2006] (19)

Así que los modelos que se comparan son los que demostrablemente no encajan en los hechos, y posiblemente no están de acuerdo con las teorías que supuestamente se están comparando. Pero los resultados del documento son sorprendentes y sugieren una metodología para comparaciones objetivas de modelos psicológicos con diferentes primitivos.

7 MODELOS SEMÁNTICOS

Es hora de volver a la imagen (1) y llenar el hueco en el medio. Tengo que confesar aquí que los detalles me parecen tener mucho más interés por una semántica que por un ingeniero. Pero son un preliminar esencial para entender algunas afirmaciones de Suppes, Suppes y otros que se mencionan regularmente en la literatura. Así que continuamos. El modelo de la izquierda en (1) consiste en un fragmento de texto, por ejemplo, nuestra versión más reciente del ejemplo de Feynman:

$x(t)=Ae^{-\gamma t/2}\cos(\omega_\gamma t)$ (para todo $t \in J$) (20)

donde $\omega_\gamma^2 = \omega_0^2 - \gamma^2/4$.

Tal como está, el texto no es verdadero ni falso, porque los primitivos están colgados en el aire sin significados unidos a ellos. ¿Qué tipo de significados tendríamos que dar para hacer (20) verdadero? No se trata sólo de una pregunta sobre el texto en sí; podría haber algunas formas ingeniosas de interpretar (20) que lo hacen verdadero o falso, pero no tienen nada que ver con las intenciones detrás de él. Los ingenieros a menudo se ríen de los matemáticos para interpretar ecuaciones de maneras que no tienen una posible realidad física, por ejemplo, utilizando tuberías de diámetro negativo. Pero lastima los matemáticos: sólo se les dieron las ecuaciones, no la experiencia en ingeniería que motivó las ecuaciones. En el último recurso tendrá que ser el trabajo de los ingenieros para eliminar la basura.

Pero al menos podemos fijar qué tipo de interpretación tendría sentido lógico. Es una práctica normal suponer que cada interpretación tiene un tema que consiste en algunos objetos básicos; los lógicos los llaman individuos, y el conjunto de individuos en una interpretación se llama el dominio. En (20) realizamos operaciones aritméticas utilizando los primitivos, por lo que los objetos básicos, más vale que sean números de algún tipo. El propio Feynman a veces los toma como números reales y a veces números complejos. No importa: de cualquier manera hay una clase de elementos. Inspeccionando (20), podemos ver que los primitivos A, a, ϒ, ω_0, y ω_Υ, 0 y o deben interpretarse como una posición para los elementos. Pero x tiene que ser leído como una función que lleva los individuos a los individuos, y J tiene que ser leído como un conjunto de elementos. 'Individual', 'función de individuos a individuos' y 'conjunto de individuos' son tres ejemplos de tipos. Otros ejemplos de tipos son 'par ordenado de individuos', 'función tomando pares ordenados de individuos a los individuos, y así sucesivamente. Los tipos posibles se pueden catalogar y luego interpretar conjunto teóricamente; ver por ejemplo [Kamareddine et al., 2004] para un tratamiento exhaustivo.

A veces tiene sentido dividir el dominio en diferentes "segmentos". Por ejemplo, puede haber un tipo que consta de números (que se pueden multiplicar pero no concatenar) y otro para cadenas de símbolos (que se pueden concatenar pero no multiplicar). No hay necesidad de hacer esto con el ejemplo de Feynman, pero podría ser sensato con el de Hoare.

Una estructura de tipo para un fragmento de texto es una asignación de un tipo a cada primitivo del texto, de una manera que se ajusta a la sintaxis. (Por ejemplo, en (20) x debe tener el tipo de una función porque la aplicamos a t. Estrictamente necesitamos asignar tipos a las variables también, y t tendrá el tipo de un individuo, de modo que x tiene el tipo de una función en individuos.) Un fragmento de texto con una estructura de tipo adjunta se conoce como una teoría.

Supongamos que hemos acordado una estructura de tipo para (20) para que se convierta en una teoría. Entonces podemos interpretar (20) de la siguiente manera. Primero suministramos un dominio de individuos. Para la uniformidad podemos tomar "dominio" para ser un primitivo, por lo que el suministro de este dominio es de hecho la interpretación de un primitivo. Luego proporcionamos, para el otro primitivo, un objeto del tipo correcto, basado en el dominio dado. Vamos por la lectura de 'número real' de (20); entonces el dominio es el conjunto R de números reales. A cada uno de los primitivos A, γ,ω_0 y ω_γ, a los que asignamos un número real, a x asignamos una función de números reales a números reales, y a J asignamos un conjunto de números reales. Una forma de describir la asignación es dar una tabla de búsqueda, por ejemplo

PRIMITIVAS	INTERPRETACIONES
dominio	$\mathbb{R}$
A	13
γ	5
ω_0	1.5
ω_γ	1.4
$x(t)$	t^2
J	el intervalo $[0, 20]$ in $\mathbb{R}$

(21)

A la izquierda enumeramos las primitivas, y a la derecha ponemos sus interpretaciones. También hay algunos otros símbolos que hemos ignorado hasta ahora, a saber, los símbolos para operaciones aritméticas como la adición y la exponenciación. Debemos volver a este punto al final de esta sección. Por el momento, considere que estos primitivos aritméticos tienen los significados aritméticos habituales.

Una tabla de búsqueda como en (21) se conoce como una estructura (debido a su parecido cercano a las cosas que los matemáticos llaman estructuras, por ejemplo, espacios vectoriales y gráficos). Normalmente para una estructura, los objetos nombrados en el lado derecho de (21) son números, conjuntos y funciones. Dado que la estructura (21) respeta los tipos de primitivos en (20), podemos leer significativamente la teoría (20) como una declaración sobre la estructura (21). Esta declaración será verdadera o falsa; si es cierto decimos que (21) es un modelo semántico de (20). Esta es la noción básica de la teoría del modelo ([Hodges, 1997]), y es la misma noción de modelo semántico que introdujimos brevemente en la Sección 1 anterior. (Para que conste, (21) es claramente un modelo no semántico de (20); la función asignada a la x primitiva es bastante incorrecta.)

Los modelos teóricos tienden a asumir que sus teorías están escritas en lenguajes artificiales de lógica. Una razón para hacer esta suposición es que estos lenguajes artificiales tienen sus estructuras, incorporadas en ellos desde el principio. Por el contrario, si toma un fragmento de texto de ingeniería con cualquier complejidad real, puede ser un trabajo difícil elaborar una estructura de tipo para él, y es posible que tenga que reescribir partes de ella para adaptarse a los tipos. Por razones de este tipo, muchos lógicos y filósofos de la ciencia solían argumentar que una teoría siempre debe estar en un lenguaje lógico formalizado.

Pero en el modelado es común usar lenguaje matemático informal para expresar teorías. Patrick Suppes ha argumentado durante muchos años que los lenguajes formales de la lógica (por ejemplo, la lógica de primer orden) son inapropiados para las teorías científicas.

> Casi todas las teorías científicas sistemáticas de cualquier interés o poder asumen una gran cantidad de matemáticas como parte de su respaldo formal. No hay una manera simple o elegante de incluir este trasfondo matemático en una formalización estándar que asume sólo el aparato de la lógica elemental. Este punto único ha sido responsable de la falta de contacto entre gran parte de la discusión de la estructura de las teorías científicas por los filósofos de la ciencia y las discusiones científicas estándar de estas teorías. ([Suppes, 2002, p. 27] (22)

También se han utilizado argumentos similares en el contexto del modelado funcional.

Parte del caso de Suppes es que las teorías utilizadas en el modelado, muy a menudo tienen un sistema de números integrado en ellas. Por ejemplo, vimos que (20) tiene algunos símbolos que están destinados a ser leídos como operaciones aritméticas estándar. Si consideramos estos símbolos como primitivos, entonces tenemos que incluir sistemas numéricos en nuestras estructuras; esto es contra intuitivo: el sistema de números reales apenas forma parte de un sistema de peso de resorte. La alternativa, que seguimos en (21), es decir que estos símbolos tienen significados fijos en el lenguaje de la teoría. Pero luego hemos dejado el territorio de la lógica de primer orden, ya que los lenguajes de la lógica de primer orden no tienen símbolos fijos para las operaciones aritméticas. Estrictamente podríamos usar lógicas de tipo superior, y en las especificaciones de software esto es bastante común. Pero como Suppes implica, es difícil hacer estas lógicas 'sencillas o elegantes'. La mayoría de los modeladores hidrodinámicos ciertamente no querrían ser molestados con tales cosas.

8 ADJUNTAR LA TEORÍA AL SISTEMA

Todavía no hemos conectado nuestro modelo/teoría (20) a un sistema de peso de resorte S. No hemos podido hacerlo porque nuestra tabla de búsqueda (21) nunca mencionó S. Para hacer la conexión necesitamos una tabla de búsqueda diferente que defina los primitivos en términos de S. Por ejemplo:

Tenga en cuenta a la vez, que para que esta tabla de búsqueda tenga sentido en absoluto, tenemos que proporcionar S con coordenadas de espacio y tiempo. También S debe tener otras características que no son observables inmediatamente, como una frecuencia fundamental, un coeficiente resistivo y una energía.

La tabla (23) define una estructura. Recuerde de la Sección 7 que, en una estructura, las interpretaciones de los primitivos son los objetos nombrados a la derecha, no el texto real de la derecha. Así como en (21), ϒ se interpreta como un número real en particular, aunque ahora tenemos que examinar S para ver cuál es ese número. Del mismo modo x se interpreta como una función de números reales a números reales, aunque la función ahora se define en términos del comportamiento de S, no en términos puramente matemáticos.

PRIMITIVAS	INTERPRETACIONES
DOMINIO	$\mathbb{R}$
A	$\sqrt{2T/k}$ Donde T es la energía de S en $t=0$ y k es la constante del resorte S
γ	coeficiente de resistencia de S
ω_0	frecuencia fundamental de S
ω_γ	el cuadrado de la frecuencia fundamental de S menos un cuarto del cuadrado del coeficiente resistivo de
$x(t)$	el desplazamiento vertical ascendente del peso S en el tiempo t
J	Intervalo $[0, 20]$ en la escala de tiempo de S

(23)

Tenga en cuenta que la estructura definida por (23), bien podría ser exactamente la misma estructura que una de la forma (21). Esto sucedería si los números, funciones, etc., nombrados en el lado derecho de (21) fueran exactamente los mismos que los leídos de S en (23). La mención de S en (23) afecta a la forma en que encontramos los números, pero en principio, los mismos números podrían ser nombrados directamente.

El objetivo de Feynman era dar una descripción correcta del comportamiento de los sistemas de peso - resorte. Su teoría (20) es una descripción correcta del comportamiento del sistema en particular S si y sólo si la estructura (23) es un modelo semántico de (20). Podemos describir esta situación de la siguiente manera.

Que M sea una teoría con un conjunto determinado de primitivos. La teoría se puede leer como una definición de una clase de estructuras, a saber, todas aquellas estructuras que hacen asignaciones de los tipos correctos a todos y sólo los primitivos de M, son modelos semánticos de M. Esta clase se denomina clase de modelo de M, en símbolos Mod (M).

La clase de modelo de cualquier teoría consistente es un objeto enorme, una clase adecuada, para utilizar la terminología de los teóricos establecidos. Si uno quisiera utilizar la clase de modelo para representar la teoría, tendría sentido reducir la clase a un conjunto manejable de estructuras representativas. Por suerte, hay algunos tipos de teoría que tienen un único modelo semántico 'canónico' que en cierto sentido contiene tanta información como toda la clase de modelo. Cabe mencionar dos de estos casos.

El primer caso es donde la teoría simplemente indica cuáles son ciertas funciones numéricas, dados ciertos parámetros. El ejemplo de Feynman es un ejemplo a seguir. La teoría (20) indica los valores de una función x, dados ciertos parámetros A, γ, ω_0 y J. (El parámetro J fija el dominio de la función. El parámetro ω_Υ puede ser ignorado ya que la teoría simplemente dice que es una abreviatura de una expresión en términos de ω_0 y ϒ). El truco ahora es convertir la teoría para que los parámetros A, γ,ω_0 y J se conviertan en variables que van más allá (digamos) de los números reales positivos. Esta conversión se convierte (20) en la teoría

$$\begin{aligned} &x(t, A, \gamma, \omega_0, J) = Ae^{-\gamma t/2}\cos(\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2/4}\,t) \\ &(\text{para todo} \quad t \in J; A, \gamma, \omega_0 \geqslant \gamma/2 > 0; J \quad \text{un intervalo en} \quad \mathbb{R}) \end{aligned} \tag{24}$$

Esta teoría sólo tiene un modelo semántico. El modelo corresponde a diferentes sistemas de peso de resorte, ya que tomamos diferentes valores para A, ϒ, ω_0 y J. Tenga en cuenta que el modelo semántico es casi lo mismo que la función en (13); las principales diferencias son la dependencia de J (que aún no habíamos discutido en la Sección 4), y el apego de la función primitiva x.

Esta reducción a un único modelo semántico está disponible para muchos modelos numéricos. En general, se aplica a los modelos informáticos utilizados para modelar turbinas eólicas, si consideramos las salidas calculadas como descripciones de funciones matemáticas. Diferentes ejecuciones del programa con diferentes parámetros corresponden a diferentes valores de parámetros en las funciones calculadas.

Una teoría en la lógica de primer orden, si tiene algún modelo semántico con infinitamente muchos individuos, tiene muchos modelos semánticos de diferentes tamaños. (Esta es una consecuencia del Teorema Upward Löwenheim-Skolem [Hodges, 1997, p. 127].) Así que las teorías de primer orden están casi garantizadas para ser inadecuadas para este caso. La teoría (24) no es de primer orden, porque tiene expresiones con significados aritméticos fijos.

El segundo caso es donde la teoría es de primer orden, pero de una forma particular llamada Cuerno universal. Una frase típica de Cuerno universal tiene la forma 'Para todos los $x_1,\ldots,x_n$, si ϕ_1 y ... y ϕ_k entonces ψ', donde $\phi_1 \ldots\ldots \phi_k$, ψ son fórmulas atómicas (por ejemplo, ecuaciones). Las teorías universales del Cuerno tienen modelos semánticos "libres" cuyos elementos satisfacen el número mínimo posible de fórmulas atómicas; un modelo libre se determina (hasta el isomorfismo, pero hay una opción canónica en la clase de isomorfismo) por el tamaño de su 'base', es decir, su conjunto de generadores. Si A es un modelo libre de una teoría universal del Cuerno M y A tiene una base infinita, entonces podemos recuperar de

A el conjunto de todas las frases de primer orden que se derivan de M. Para más detalles (incluyendo la conexión con 'modelos iniciales') véase [Hodges, 1993].

En la actualidad, las principales aplicaciones prácticas de las teorías universales del Cuerno se encuentran en la informática. De hecho, las especificaciones del software a menudo se escriben enteramente en oraciones universales de Horn. (Véase, por ejemplo, las «especificaciones gratuitas» en CASL [Astesiano et al., 2002].)

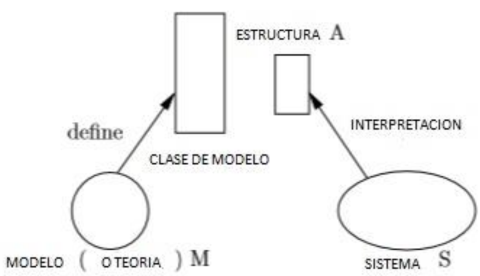
Frederick Suppe propone que apliquemos el nombre "teoría" no a una teoría en nuestro sentido, sino a su clase modelo (más precisamente a su clase de "sistemas físicos inducidos por la teoría").

> Su razón es que como empleado por los científicos realmente en funcionamiento, las teorías admiten una serie de formulaciones lingüísticas alternativas —por ejemplo, la mecánica de partículas clásica a veces se da una formulación lagrangiana y otras veces una formulación hamiltoniana— pero es la misma teoría independientemente de la formulación que se emplee. Como tal, las teorías científicas no pueden identificarse con sus formulaciones lingüísticas; más bien, son entidades extralingüísticas a las que se hace referencia y se describen mediante sus diversas formulaciones lingüísticas. ([Suppe, 1977, p. 82ff])

La propuesta de Suppe es técnicamente errónea; Las formulaciones lagrangianas y hamiltonianas utilizan diferentes primitivos, y diferentes primitivas implican clases de modelos desarticulados. Más importante, uno de los principales propósitos de tener teorías es que podemos escribirlas en artículos de revistas o en diapositivas de computadoras. No podemos hacer eso con clases de modelo, o incluso con modelos semánticos individuales cuando tienen dominios infinitos. Para pensar en una clase modelo o una estructura en absoluto, necesitamos describirlo en palabras o imágenes, y luego estamos de vuelta con una teoría lingüística.

9 ISOMORFISMO Y SIMILARIDAD

Nuestro diagrama (1) ahora tiene dos nuevos tipos de entidad en el medio:



(26)

El modelo M de la izquierda era textual, así que lo equipamos con una estructura tipo en sus primitivos y lo llamamos teoría. Luego presentamos su clase de modelo (arriba a la izquierda). Para relacionar la teoría con el sistema S de la derecha, interpretamos cada primitivo en términos de S. Esta interpretación nos dio una estructura A (arriba a la derecha). Ahora las tres declaraciones siguientes significan lo mismo:

A está en la clase de modelo de M.

A es un modelo (semántico) de M.

Leer como una descripción de A, M es verdadero.

La literatura de modelado contiene otras dos posibles relaciones entre A y M que se alega que son útiles. La primera es que A es 'isomórfica a un modelo de' M, y la segunda es que A es 'similar a un modelo de' M. ¿Y si algo añaden estas nociones a la imagen que ya tenemos?

Isomorfismo

Supongamos que A y B son dos estructuras con los mismos primitivos y estructura de tipo. Supongamos también que hay una correspondencia uno a uno i entre el dominio de A y el dominio de B. Decimos que es un isomorfismo de A a B, si hago B una copia perfecta de A en el siguiente sentido: para cada primitivo p, si tomamos la interpretación de p en A y aplicamos i a ella para cambiar los elementos del dominio de A en elementos del dominio de B, lo que terminamos con i es exactamente la interpretación de p en B.

Por ejemplo, supongamos que los dominios de A y B son el conjunto R de números reales, e i es la correspondencia que hace que cada número real x corresponda a -x. Supongamos también que uno de los primitivos de A es el símbolo <, interpretado en A como la relación 'menor que'. A continuación, si i es un isomorfismo, la interpretación de < en B debe ser la relación 'mayor que', ya que x es menor que y si y sólo si -x es mayor que -y.

Uno de los teoremas básicos de la teoría del modelo afirma que (en condiciones que probablemente se satisfagan con cualquier ejemplo que pueda esperar cumplir) si A es isomórfico a B entonces A y B son modelos de exactamente las mismas frases. De ello se deduce que A está en la clase de modelo de M si y solo si A es isomórfica a alguna estructura en la clase de modelo de M. Así que la relación 'A es isomórfica con un modelo de M' no nos da nada nuevo.

Hay maneras de usar la noción de isomorfismo para dar algo nuevo y útil. Por ejemplo Suppes [este compilación] muestra la utilidad de los teoremas de representación, que afirman que en alguna clase M de estructuras, cada estructura es isomórfica a una en alguna clase más pequeña B.

Pero soy muy escéptico de algunos otros usos que he visto sugeridos. Por ejemplo, he visto que sugirió que debíamos distinguir entre estructuras 'numéricas' como (21) y estructuras del mundo real como (23), y decir que la estructura numérica es un modelo del mundo real si son isomórfica. Esto parece ser un simple malentendido. Como señalamos en la sección anterior, estructuras como (21) no son más o menos numéricas que la estructura (23) y de hecho no pueden ser la misma estructura.

Similitud

No existe una definición estándar de similitud entre estructuras. Pero cuando las estructuras contienen funciones numéricas, hay algunas formas obvias de definir las relaciones de similitud. Por ejemplo, supongamos que el símbolo de función f es un primitivo y su estructura de tipo hace que sea para una función de R a R. Supongamos que A y B son dos estructuras que interpretan f como la función F y la función G respectivamente. A continuación, podemos elegir un pequeño número real positivo y describir A y B como 'similar' si para toda x real, la diferencia entre F(x) y G(x) es menor que ε.

Este dispositivo tiene usos, pero algunas advertencias están en orden. En primer lugar, el uso más obvio de este dispositivo es hacer el mismo trabajo que las aproximaciones que discutimos en la Sección 6. En esa sección tratamos las aproximaciones ajustando las declaraciones hechas, no las estructuras sobre las que se hicieron. No hay duda de que hay razones para preferir un enfoque al otro, pero es probable que dependan de los detalles del caso en cuestión.

En segundo lugar, el hecho de que sea fácil poner un límite ε en la diferencia entre A y B no garantiza que el límite sirva a ningún propósito útil. Por ejemplo, si las funciones F y G son similares en este sentido, sus transformaciones de Fourier no tienen por qué serlo, aunque las funciones y sus transformaciones de Fourier pueden contener esencialmente la misma información.

En tercer lugar, no todas las referencias a la "similitud" en la literatura se pueden leer de esta manera. Por ejemplo [Giere, 1999, p. 92] dice

> Los modelos sólo tienen que ser similares a los sistemas del mundo real en un aspecto especificado y con grados limitados de precisión.

Pero él da el sistema Tierra-Luna como un ejemplo de un 'sistema del mundo real'; ya que el sistema Tierra-Luna no es una estructura, la noción de similitud anterior no se aplica a él. No me siento competente para explicar qué tipo de relación de similitud tiene Giere en mente.

Hay más que decir sobre la relevancia de las clases de modelos para el modelado, aunque la mayoría de las discusiones en la literatura son sobre modelos científicos más que tecnológicos. Véase, por ejemplo, [Balzer et al., 19 87] (que representan la tradición estructuralista), [Niiniluoto, 1999] (que analiza el papel de las estructuras en la explicación científica) y [Kuipers, 2001] (un tratamiento muy exhaustivo que toma en cuenta tanto lo explicativo como funcional).

CAPITULO IV

MODELOS COMO HERRAMIENTAS EPISTEMICAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

Por Mieke Boon and Tarja Knuuttila

1 INTRODUCTION

Al navegar por revistas científicas en el campo de las ciencias de la ingeniería, pronto nos enteramos de que los modelos juegan un papel central en ellos. A través del modelado, las ciencias de la ingeniería se esfuerzan por comprender, predecir u optimizar el comportamiento de los defectos o las propiedades de diversos materiales, ya sean reales o posibles. Los modelos desarrollados en las ciencias de la ingeniería deben distinguirse de los modelos producidos en ingeniería. Mientras que estos últimos suelen representar el diseño de un comportamiento o su funcionamiento mecánico, los modelos en las ciencias de la ingeniería tienen como objetivo la suposición científica del comportamiento de los diferentes dispositivos o las propiedades de diversos materiales. Por ejemplo, la ingeniería química se ocupa del diseño de procesos para convertir materiales o productos químicos en otros materiales y productos químicos que cumplan ciertas funciones o propósitos. Para estos procesos utiliza dispositivos, tales como reactores químicos y equipos para la separación de sustancias como la cristalización, precipitación, absorción, filtración y destilación. La investigación científica en el campo de la ingeniería química propone modelos del comportamiento de los dispositivos químicos. Por lo general, procede a estudiar el comportamiento de los dispositivos interpretándolos en términos de fenómenos físicos considerados relevantes para su correcto o mal funcionamiento, y luego modelando estos fenómenos. Ejemplos de tales fenómenos son las reacciones químicas deseadas e indeseables, el transporte de líquidos, gases y sólidos dentro del dispositivo, el transporte de compuestos químicos por medio de flujo de fluido o difusión en el fluido, el transporte de calor por convección o conducción y otros procesos físicos como la absorción, disolución, ionización, precipitación, vaporización y cristalización. En la literatura científica, los autores suelen proponer un cierto tipo de diseño del dispositivo — que consiste en una configuración (por ejemplo, un esquema de su construcción mecánica y dimensiones) y sus condiciones químicas y físicas — para cumplir una determinada función, por ejemplo, para producir un compuesto de alta pureza y con un mínimo de producción de residuos y uso de energía.

Del mismo modo, la ingeniería eléctrica se ocupa del diseño de dispositivos, de modo que conviertan o transformen la entrada eléctrica, electromagnética o mecánica en salida eléctrica, electromagnética o mecánica que cumpla con ciertas funciones. Al igual que en el caso de la ingeniería química, la investigación científica en el campo de la ingeniería eléctrica propone modelos del comportamiento de los dispositivos eléctricos, que la tarea difiere del diseño (por ejemplo, de circuitos eléctricos) de dichos dispositivos. Al igual que en este campo científico, los artículos científicos tienen como objetivo contribuir a la optimización de los dispositivos con respecto a su funcionamiento. O, por ejemplo, por poner un tercer ejemplo, la ingeniería de materiales se refiere a la aplicación de materiales con propiedades (por ejemplo, propiedades químicas, eléctricas o mecánicas) que cumplen ciertas funciones. Por ejemplo, metales resistentes a la corrosión, cerámicas que son superconductoras a temperaturas más altas y polímeros de una resistencia particular. La ciencia de los materiales se refiere a la comprensión científica de los materiales —ya sea de materiales que ya existen o de materiales que los científicos pretenden crear artificialmente— que entonces indican maneras de crear o intervenir con propiedades materiales específicos.

Como muestran los ejemplos anteriores, las ciencias de la ingeniería tienen como objetivo promover el desarrollo de dispositivos y materiales que cumplan ciertas funciones y optimizarlos. A través del modelado, el científico de ingeniería busca comprender el comportamiento y las propiedades de varios dispositivos y materiales. Más a menudo que no, esto implica concebir el funcionamiento del dispositivo, a menudo en términos de fenómenos físicos particulares que producen el funcionamiento adecuado o incorrecto del dispositivo. Sin embargo, en muchos casos, los dispositivos y materiales deseados que funcionan correctamente no existen. En estos casos, los modelos científicos funcionan como herramientas para producir tales dispositivos y materiales.

Para entender las ciencias de la ingeniería y la forma en que utilizan el modelado para optimizar y crear dispositivos, y materiales para cumplir con funciones específicas, necesitamos una cuenta de cómo se producen y utilizan los modelos científicos en la práctica científica. En particular, esto implica dar sentido a cómo los modelos de las ciencias de la ingeniería adquieren valor cognitivo con respecto a su propia orientación hacia lo artificial, es decir, cómo los modelos permiten a los científicos razonar a través de su construcción y uso. Para esta tarea, un mero enfoque de representación de los modelos resulta demasiado limitador.

En la filosofía de la ciencia se acepta generalmente que los modelos científicos representan algunos aspectos o partes del mundo o, más específicamente, algunos sistemas de objetivos reales. Esta idea de modelos como representaciones ha recibido diferentes formulaciones que van desde los relatos semánticos hasta los pragmáticos de representación. Según la concepción semántica de los modelos de representación son estructuras que representan las propiedades estructurales de los sistemas de destino reales como la característica y en los informes experimentales y de medición por ser isomórficas o similares a ellos. Desde la perspectiva pragmatista esto equivale a acercarse a la investigación desde el punto de vista de la ciencia terminada, sin embargo, parece más adecuado concebir especialmente a los científicos de ingeniería como intermediarios activos con el mundo. En lugar de representar un mundo ya existente, las ciencias de la ingeniería apuntan a teorías y modelos que proporcionan comprensión de los fenómenos creados artificialmente. Este papel de las ciencias de la ingeniería nos parece mejor acomodado por una visión pragmática sobre ellas. De hecho, como mostraremos a continuación, el enfoque pragmático de la representación apunta de hecho a una comprensión más versátil de los modelos que a lo que otorga un mero enfoque representativo para ellos.

A continuación consideraremos los modelos científicos en ingeniería como herramientas epistémicas para crear u optimizar dispositivos o materiales de hormigón. Desde esta perspectiva pragmatista y funcional, los modelos científicos aparecen como cosas que son utilizadas por los científicos para hacer algún trabajo, en otras palabras, para cumplir algunos propósitos. En consecuencia, abordamos la modelización como una práctica científica específica en la que las entidades concretas, es decir, los modelos, se construyen con la ayuda de medios de representación específicos y se utilizan de diversas maneras, por ejemplo, para fines de razonamiento científico, teoría construcción y diseño de otros artefactos e instrumentos. La clave del valor epistémico de los modelos no radica en ser representaciones precisas de algunos sistemas objetivo reales, sino más bien en su construcción sistémica independiente que permite a los científicos extraer inferencias y razonar a través de la construcción de modelos y manipulándolos. Aunque esta forma de ver los modelos tiene sentido especialmente en el contexto de las ciencias de la ingeniería debido a su carácter interviniente y constructivo, sugerimos que podría aplicarse también a otras ciencias. En este sentido las ciencias de la ingeniería podrían incluso servir para destacar algunas características de la modelización científica y la representación en general, especialmente si las ciencias de la ingeniería se distinguen firmemente de la ingeniería (véase más arriba). Este capítulo tiene por objeto, por tanto, dar una visión general de los diversos relatos de los modelos científicos y la representación en la filosofía de la ciencia, y mostrar en qué direcciones estos enfoques se han ampliado recientemente con el fin de capturar el papel de los modelos científicos en mejores prácticas científicas.

Procederemos de la siguiente manera y comenzaremos presentando una visión general de la discusión actual de los modelos y la representación en la filosofía de la ciencia, y explicando cómo la concepción de los modelos como herramientas epistémicas encaja en este panorama más general (Sección 2). A su vez, esta discusión general sobre los modelos nos proporciona un trasfondo para analizar el modelo Carnot del motor térmico, que, como argumentaremos, todavía puede servir como un caso paradigmático de modelado en ciencias de la ingeniería (Sección 3). La sección final reúne los temas de este capítulo y señala diferentes temas que una comprensión ampliada de los modelos debe tener en cuenta (Sección 4).

2.- MODELOS CIENTIFICOS EN FILOSOFIA DE LA CIENCIA: DESDE REPRESENTACIONES A HERRAMIENTAS EPISTEMICAS

A juzgar por su virtual ausencia de la discusión filosófica general sobre el modelado, los modelos en ciencias de la ingeniería no se han calificado como objetos dignos de estudio. Esto puede deberse a la tendencia de los filósofos a relegar las ciencias de la ingeniería al ámbito de la aplicación. Sin embargo, en la actualidad se está discutiendo intensamente la filosofía de la ciencia en relación con los modelos y el modelado, que se debe en gran medida a su creciente importancia en la ciencia contemporánea. Se han presentado nuevas cuentas de modelos y su valor epistémico o cognitivo que también parecen adaptarse mejor al modelado en las ciencias de la ingeniería. A continuación, examinaremos en breve este debate en un intento de demostrar que el énfasis en la presentación de representación impone limitaciones excesivas a nuestra visión de la naturaleza conocedora de los modelos. Como alternativa, sugerimos que los modelos podrían abordarse como herramientas epistémicas.

2.1 Modelos como representaciones:

La discusión sobre los modelos en la filosofía de la ciencia tiene comienzos heterogéneos. Da fe de las aspiraciones teóricas y formales, así como de las prácticas, que pueden verse que tienen objetivos diferentes e incluso contradictorios [Bailer-Jones, 1999, 32]. Así, paralelamente a los enfoques que se centran en el papel pragmático y cognitivo de los modelos en la empresa científica, se ha intentado establecer, dentro de un marco formal, qué son los modelos científicos. De los enfoques formales, la concepción semántica fue la concepción más ampliada de los modelos durante varias décadas, desde su aparición a principios de los años sesenta. Sin embargo, se puede afirmar que la discusión muy filosófica de los modelos ha estado, de manera importante, motivada por consideraciones orientadas a la práctica, incluso los proponentes de la teoría semántica se entendieron a sí mismos como una imagen más realista de las teorías (véase [Van Fraassen, 1980, 64]).

Aunque ha habido perspectivas diferentes sobre los modelos, los filósofos de la ciencia todavía han estado de acuerdo en general, en que los modelos son representaciones y, como tales, nos dan conocimiento, porque representan sus supuestos objetivos externos más o menos precisamente, en los aspectos pertinentes [Bailer-Jones, 2003; da Costa y French, 2000; French y Ladyman, 1999; Frigg, 2002; Morrison y Morgan, 1999; Suárez, 1999; Giere, 2004]. Sin embargo, debido a su enfoque general de los modelos, diferentes filósofos han presentado relatos de representación muy divergentes. La línea divisoria fundamental va entre las cuentas que toman la representación como una relación entre dos cosas, el modelo y su sistema objetivo, y los pragmáticos, según los cuales también los usuarios de representación y sus propósitos, deben ser tomados en cuenta, abogando así por al menos tres análisis colocados de la representación.

La convicción de que la representación puede explicarse volviendo únicamente a las propiedades del modelo y su sistema objetivo, es parte integrante del enfoque semántico del modelado científico. Recientemente, la concepción semántica ha sido defendida, por ejemplo, por da Costa-French [2000], y French -Ladyman [1999]. Según la concepción semántica, los modelos especifican estructuras que se plantean como posibles representaciones de los fenómenos observables o, aún más ambiciosamente, de las estructuras subyacentes de los sistemas objetivo reales. La relación de representación entre los modelos y sus sistemas objetivo se analiza en términos de isomorfismo: una estructura determinada representa su sistema objetivo si ambos son estructuralmente isomórficos entre sí [Van Fraassen, 1980, pp. 45, 64; Suppe, 1974, págs. 97, 92; Francés, 2003; French y Ladyman, 1999]. El isomorfismo se refiere a un tipo de mapeo que se puede establecer entre los dos, que preserva las relaciones entre los elementos. En consecuencia, el poder de representación de una estructura deriva de su ser isomórfico con respecto a algún sistema real o una parte de él. (Otros candidatos ofrecidos para el análisis de la representación por los proponentes de la vista semántica son la similitud [Giere, 1988] y el homomorfismo [Bartels, 2006].)

El atractivo teórico antes mencionado, es que el amorfismo desaparece una vez que nos damos cuenta de que las partes del mundo real que pretendemos representar no son "estructuras" de ninguna manera obvia, al menos no en el sentido requerido por el relato semántico. Es posible escribir estructuras en algunas partes del mundo real, pero esto implica que estas partes del mundo empírico ya están modeladas (o representadas) de alguna manera. Esto, por supuesto, ha sido notado por los defensores de la teoría semántica. Patrick Suppes [1962] ha invocado, por ejemplo, "modelos de datos" para explicar el hecho de que el amorfismo se refiere a la relación entre las estructuras, no a la relación entre los datos sin procesar y la teoría. Por lo tanto, este amorfismo requerido por el relato semántico se refiere realmente a la relación entre un modelo teórico y un modelo empírico, siendo el modelo teórico el modelo que satisface las ecuaciones de la teoría [Suppe, 1989, 103–106].

Incluso si ignoramos el problema que, el mundo no nos presenta en estructuras prefabricadas, el isomorfismo no nos da un relato satisfactorio de la representación, porque no captura algunas características comunes de la representación. En primer lugar, el isomorfismo tiene propiedades formales equivocadas. Por ejemplo, el isomorfismo denota una relación simétrica, mientras que la representación no: queremos que un modelo represente su sistema de destino, pero no viceversa. En segundo lugar, y más fundamentalmente, el isomorfismo es una relación entre dos estructuras, mientras que la representación científica asume una relación entre una estructura y un sistema objetivo del mundo real. El isomorfismo estructural no es suficiente para la representación, ya que la misma estructura puede ser instanciada por diferentes sistemas y por lo tanto es el amorfismo. Por lo tanto, el isomorfismo por sí solo no es capaz de fijar la extensión de la representación. Por otro lado, un determinado sistema objetivo no necesita tener una estructura única; dependiendo de la perspectiva adoptada, se puede cortar de manera diferente (véase [Frigg, 2006, 56–59]). Desde el punto de vista de la práctica científica, la idea de que el isomorfismo establece una representación científica parece inadecuada, o al menos poco fructífera. La idea de que la representación es una representación exacta de su objeto o no una representación en absoluto no se ajusta a nuestras prácticas de representación reales. Es típico de los modelos científicos sean inexactos en muchos sentidos. De hecho, el importante papel de las idealizaciones, las simplificaciones, las aproximaciones y las consideraciones de docilidad en el modelado parecen difíciles de tener en cuenta desde la perspectiva semántica; para comentarios adicionales sobre estos temas, los lectores podrían referirse a la contribución de Hodges a esta compilación (CAP 5). Además, parece inaceptable considerar que los casos en los que el amorfismo entre la estructura teórica y el sistema objetivo real previsto, fallan como poco representativos.

Los enfoques pragmáticos, a su vez, hacen que la representación sea menos una característica de los modelos y sus propios sistemas de destino que un logro de los usuarios de representación [Suarez, 2004; Giere, 2004; Bailer-Jones, 2003; Frigg, 2006]. Estos estudios critican la suposición de que la nueva presentación podría considerarse como una relación de dos lugares de correspondencia entre el vehículo representativo y su objetivo. Esta forma de concebir los intentos de representación, como sacó Suárez [2004] lo ha dicho acertadamente, "reducir los juicios esencialmente intencionales de los usuarios de representación a hechos sobre los objetos o sistemas de origen, de destino y sus propiedades" (p. 768). Por el contrario, los enfoques pragmáticos señalan que nada es una representación de otra cosa en sí misma; tiene que ser siempre utilizado por los científicos para representar alguna otra cosa [Teller, 2001; Giere, 2004]. En consecuencia, lo que es común a los enfoques pragmáticos es su enfoque en la actividad intencional de los científicos como representadores y la negación de que la relación de representación con lo que se representa puede basarse sólo en las propiedades respectivas del vehículo representativo y su blanco objetivo.

Los enfoques pragmáticos de representación resuelven los problemas de la noción semántica de representación mencionada anteriormente; las intenciones de los usuarios crean la direccionalidad necesaria para establecer una relación representativa e introducir la indeterminación en las relaciones representativas (ya que los seres humanos como representadores son falibles). Pero esto tiene un precio. Cuando la representación se basa principalmente en los objetivos específicos y en la representación de la actividad de los seres humanos en lugar de las propiedades del vehículo representativo y el objeto objetivo, como resultado no se puede decir nada muy sustantivo sobre la relación de representación en general. Esto también ha sido admitido explícitamente por los proponentes del enfoque pragmático (véase [Giere, 2004; Suárez, 2004]), de quien Suárez ha ido más lejos al abogar por un relato minimalista de la representación que se resiste a decir algo sustantivo sobre la supuesta base sobre la que descansa el poder de representación de los vehículos representativos, es decir, si descansa, por ejemplo, es el amorfismo, la similitud o la denotación. Según Suárez, tales relatos de representación se equivocan al tratar de "buscar una relación constituyente más profunda entre la fuente y el objetivo", lo que podría explicar como un subproducto por qué, en primer lugar, la fuente es capaz de llevar a un usuario competente a una consideración de un objetivo, y en segundo lugar, porque la representación científica es capaz de sostener el "razonamiento sustituto". En su lugar, Suárez construye su relato inferencial de representación directamente sobre las características mismas del razonamiento sustituto.

La formulación Suárez [2004, p. 773] da a la concepción inferencial de la representación es la siguiente:

> A representa B sólo si (i) la fuerza de representación de A apunta hacia B, y (ii) A permite a los agentes competentes e informados extraer inferencias específicas con respecto a B.

La "fuerza de representación", según Suárez, es "la capacidad de la fuente para llevar a un usuario competente e informado a una consideración del objetivo". Por lo tanto, la parte i) de la formulación postula que los usos representativos de la fuente son el resultado de la actividad intencional de los agentes competentes e informados. La parte ii) de la formulación contribuye a la objetividad que se requiere de la representación científica al asumir que A tiene la constitución que permite a los agentes extraer correctamente las inferencias de B. Sin embargo, Suárez se resiste a decir algo sobre qué tipo de relación se supone que hay entre la fuente y el objetivo. Por lo tanto, es legítimo concluir que para él los modelos no tienen ninguna relación únicamente determinada con el mundo real.

El enfoque pragmático minimalista de la representación tiene consecuencias bastante radicales para la forma en que concebimos modelos. Si aceptamos el enfoque minimalista de la representación, no se establece mucho al afirmar que los modelos nos dan conocimiento porque representan sus blancos objetivos. No obstante, es importante tener claro lo que establece el relato pragmático. De hecho, sólo señala la imposibilidad de dar un análisis sustancial general de la representación que explique cómo se podrían extraer del modelo el conocimiento, o la información, sobre los sistemas de destino reales (cf. Hodges en esta compilación). Los pragmáticos que no dan muchas representaciones científicas se pueden rastrear a algunos sistemas objetivo, o que pueden representarlos con mayor o menor precisión al menos en algunos aspectos, los casos más claros de tales modelos son modelos a escala y mapas. Sin embargo, si optamos por un enfoque pragmático de los modelos, el enfoque en la representación sólo comienza a parecer innecesariamente limitante.

Aparte de las razones filosóficas generales mencionadas anteriormente, también hay razones derivadas de la práctica científica que nos hacen cuestionar la fecundidad del paradigma representacional en cuanto al valor epistémico de los modelos. De ellos, no menos importante, es el hecho de que, en lugar de funcionar como representaciones directas de algunos sistemas "reales", los modelos a menudo representan algunos mecanismos tentativos, procesos o soluciones que sirven de base para diversas inferencias, intervenciones y configuraciones experimentales. En muchas ocasiones, los modelos científicos se utilizan principalmente como demostraciones, ejemplificaciones, pruebas de existencia, etc.

Los puntos filosóficos y empíricos mencionados anteriormente están destinados a preguntarse si hay algún otro ángulo que no sea la representación solo desde el acercarse a las propiedades que tienen conocimiento de los modelos. Curiosamente, en gran parte, aparte del interés mismo en el tema de los modelos y la representación, ha surgido una nueva discusión sobre los modelos que afloja el valor epistémico de los mismos, de representar sistemas objetivos definidos y los considera como objetos independientes. Este gesto, sugerimos, da lugar a los diversos roles que los mismos modelos pueden desempeñar en el esfuerzo científico y prepara el camino para concebir modelos como herramientas epistémicas (véase también [Portides, 2005]).

2.2.-Modelos como herramientas epistémicas

La idea de los modelos como objetos o entidades independientes ha sido expresada por varios autores recientes de varias maneras. Morrison [1999] y Morrison y Morgan [1999] han considerado a los modelos como agentes autónomos que son a través de su construcción parcialmente independientes de la teoría y los datos. Esto se debe a que, además de estar compuestos tanto por la teoría como con los datos, los modelos normalmente también implican "elementos adicionales 'externos'" [Morrison y Morgan, 1999, 11]. Boumans [1999] por su parte desenreda por completo los modelos del marco de datos teóricos. En su estudio sobre el ciclo de negocios muestra cuántos "ingredientes" diferentes se pueden construir con el modelo, tales como analogías, metáforas, nociones teóricas, conceptos matemáticos, técnicas matemáticas, hechos estilizados, datos empíricos y finalmente relevantes opiniones de políticas. Desde otra perspectiva, Weisberg [2007] y Godfrey-Smith [2006] también han llegado a la conclusión de que los modelos deben ser tratados como entidades independientes. Para ellos la independencia significa independencia de ciertos sistemas objetivos reales. Por lo tanto, en lugar de concebir la independencia en términos de la relación de los modelos con la teoría y el mundo, o los datos, liberan modelos para representar cualquier sistema objetivo real definido. Según Weisberg y Godfrey-Smith, el modelado puede ser visto como una práctica teórica específica propia, que puede caracterizarse a través de los procedimientos de representación y análisis indirectos que los modeladores utilizan para estudiar los fenómenos del mundo real. Con la representación indirecta, ellos se refieren a la forma en que los modeladores, en lugar de esforzarse por representar algunos sistemas de destino reales directamente, construyen sistemas de modelos simples e ideales a los que sólo se atribuyen unas pocas propiedades. Como Godfrey-Smith [2006, 734] lo ha dicho acertadamente, el modelado puede caracterizarse por el "desvío deliberado a través de sistemas meramente hipotéticos" que hace uso de ellos.

¿Cómo, entonces, los modelos son objetos tan independientes, capaces de darnos conocimiento? Mientras que Godfrey-Smith evoca la "facilidad informal sin esfuerzo" con la que podemos evaluar las similitudes entre los sistemas imaginados y los sistemas del mundo real, Weisberg se refiere a la noción de representación. Pero volver a la representación nos llevaría de nuevo a los problemas discutidos anteriormente. Por el contrario, lo que encontramos el punto más importante en la visualización de modelos como cosas independientes, es que nos permite apreciar sus características funcionales, es decir, los diferentes propósitos para los que se utilizan en la práctica científica. Esto nos da, sugerimos, una pista de cómo apreciar las propiedades epistémicas p de los modelos m desde otra perspectiva que la proporcionada por la representación.

Considerar los modelos científicos desde la perspectiva funcional requiere que uno los aborde como objetos concretos que se construyen para ciertos fines epistémicos y cuyo valor cognitivo deriva en gran medida de nuestra interacción con ellos [Knuuttila y Merz]. En consecuencia, los modelos científicos pueden considerarse herramientas epistémicas multifuncionales [Knuuttila, 2005; Knuuttila y Voutilainen, 2003]. La importancia de nuestra interacción con los modelos es reconocida por Morrison y Morgan [1999], quienes subrayan cómo aprendemos de los modelos construyéndolos y manipulándolos. Sin embargo, nos parece que dejan esta importante idea a mitad de camino. A saber, si nuestro objetivo es entender cómo los modelos nos permiten aprender de los procesos de construcción y manipulación de los mismos, no basta con que se consideren autónomos; también deben ser concretos en el sentido de que deben tener una dimensión tangible en la que se pueda trabajar. Esta concreción es proporcionada por la encarnación material de un modelo: los medios representativos concretos a través de los cuales se logra un modelo le confieren la cohesión espacial y temporal que permite su manipulabilidad. Esto también se aplica a los modelos llamados abstractos: cuando trabajamos con ellos, normalmente construimos y manipulamos medios de representación externos como diagramas o ecuaciones. Aquí radica también la razón para comparar modelos con experimentos: al idear modelos construimos sistemas artificiales, a través de los cuales podemos hacer que nuestras conjeturas teóricas sean concebibles y viables. Esto se aplica también a los modelos matemáticos como a otros tipos de modelos que se ven más fácilmente como que tienen una dimensión material.

También la propia variación de los diferentes tipos de modelos utilizados: modelos a escala, imágenes, diagramas, diferentes fórmulas simbólicas y formalismos matemáticos, sugiere que la dimensión material de los modelos y los diversos medios representativos de los que hacen uso son cruciales para su funcionamiento epistémico. Los medios de representación utilizados tienen diferentes limitaciones y prestaciones características; uno puede expresar diferentes tipos de contenido con símbolos que con imágenes, por ejemplo. Desde esta perspectiva, los diversos medios de representación externa proporcionan ayudas externas para el supervisor, que también explica en parte lo que comúnmente se atribuye como el valor heurístico del modelado (véase [Giere, 2002]). Los científicos cognitivos han abordado esta importancia de las herramientas de representación externa para nuestra cognición a través de la noción de andamios. Los andamios de representación externa reducen el espacio de búsqueda de información localizando las características más importantes del objeto, de una forma perceptualmente sobresaliente y manipulan y permiten nuevas inferencias haciendo que la anteriormente oscura o dispersa información disponible de manera sistemática (véase, por ejemplo, [Larkin y Simon, 1989; Clark, 1997; Zhang, 1997]). La ciencia proporciona la máxima actividad humana de crear y utilizar herramientas de representación con fines cognitivos. Ya es un logro cognitivo notable puede expresar cualquier mecanismo, estructura o fenómeno de interés en términos de algunos medios representativos, incluyendo suposiciones concernientes a ellos que a menudo se traducen en una forma matemática convencional . Esta articulación permite nuevos hallazgos teóricos, así como nuevas configuraciones experimentales, pero también impone sus propias limitaciones a lo que se puede hacer con un cierto modelo.

Otro aspecto del andamiaje proporcionado por los modelos está relacionado con la forma en que nos ayudan a concebir los objetos de nuestro interés con claridad y a proceder de una manera más sistemática. Los modelos se construyen típicamente de tal manera que restringen el problema en cuestión —lo que ocurre típicamente a través de idealizaciones y abstracciones—, lo que hace que la situación sea más inteligible y viable. Como el mundo real es demasiado complejo para estudiar como tal, los modelos simplifican o modifican los problemas con los que los científicos tratan. Por lo tanto, los modeladores suelen proceder convirtiendo las restricciones (por ejemplo, los supuestos del modelo específico) incorporados al modelo en asequibilidades; uno idealiza el modelo de tal manera que se puede obtener comprensión y extraer inferencias de usarlo o "manipularlo". Sin embargo, la aparente simplicidad de los modelos disfraza los diversos elementos que incorporan, como las funciones matemáticas familiares, las entidades teóricas ya establecidas, los conocimientos científicos pertinentes, ciertos conceptos de solución generalmente aceptados, el uso previsto de un modelo, los criterios epistemológicos que se supone que se aplican a él y así sucesivamente. Todas estas cosas que se construyen en un modelo le dan también cierta justificación original incorporada [Boumans, 1999]. Estos aspectos de los modelos también explican, por un lado, cómo permiten ciertos tipos de soluciones e inferencias, y por otro lado, cómo también pueden conducir a hallazgos inesperados, reforzándose así nuevos conceptos y problemas y abriendo nuevas áreas de investigación (para formación conceptual en ciencias, véase [Nersessian, 2008]).

Por lo tanto, sugerimos que adquiriéramos conocimiento a través de modelos típicamente, interactuando con ellos, es decir, construyéndolos, manipulándolos y probando sus diferentes usos alternativos, lo que en torno, explica por qué son regularmente valorados por su desempeño y sus resultados. Desde la perspectiva funcional, en lugar de tratar de representar algunos aspectos seleccionados de un sistema objetivo dado, los modeladores a menudo proceden de una manera rotonda, tratando de construir sistemas de modelos hipotéticos, a la luz de sus resultados anticipados o de ciertas características de los fenómenos que se supone que deben llevar a cabo. Si un modelo nos da ciertos resultados esperados o replica algunas características del fenómeno, proporciona un punto de partida interesante para otras conjeturas teóricas y experimentales. Esta orientación hacia los resultados obtenidos por los modelos también explica por qué los modeladores utilizan con frecuencia las mismas plantillas computacionales interdisciplinarias, como los conocidos tipos de ecuaciones generales, distribuciones estadísticas y métodos computacionales (para la noción de plantilla computacional, véase [Humphreys, 2004]). La capacidad general de nuestra capacidad de las plantillas computacionales, se basa por un lado en su generalidad y las similitudes observadas entre diferentes fenómenos y por otro lado en su tractabilidad. Los propósitos para los que se construye el modelo y las consideraciones de computabilidad, a menudo se anulan en el modelado, se esfuerzan por obtener una representación correcta. En consecuencia, la propia peculiaridad de los modelos científicos radica en ser entidades concretas que tienen como objetivo contabilizar ciertos fenómenos a través del desvío de la construcción de entidades artificiales teniendo en cuenta simultáneamente sus usos previstos y otras preguntas pragmáticas como su capacidad informática. Esta naturaleza holística de los modelos, de hecho, los distingue de representaciones científicas más elementales, como diferentes pantallas visuales, que a menudo fragmentan aún más el objeto o espécimen para revelar sus detalles (véase [Lynch, 1990]).

En consecuencia, muchos modelos científicos no deben considerarse ante todo como representaciones precisas de algunos sistemas objetivos, sino más bien como herramientas epistémicas. En un contexto de ingeniería, esto equivale a averiguar cómo producir, controlar e intervenir, o a prevenir algunas propiedades de los materiales o el comportamiento de los procesos y dispositivos. Científicos en las ciencias de la ingeniería construyen modelos con el propósito de imaginar y razonar sobre cómo mejorar el rendimiento de los dispositivos, procesos o materiales de interés. Estos modelos implican propiedades imaginables y los procesos, e incorporan variables y parámetros físicos medibles (por ejemplo, en el caso de las concentraciones químicas de ingeniería química, los caudales, la temperatura y las propiedades de materiales como la difusión, la viscosidad, la densidad). A menudo, estos modelos también incorporan dimensiones de configuraciones típicas de ciertos dispositivos. En la siguiente sección ejemplificaremos el enfoque funcional de los modelos mediante el estudio del modelo Carnot del motor térmico. Enfatizamos el propósito del modelo, la forma en que el problema original motivó la construcción del modelo y se tradujo en un fenómeno a tener en cuenta a través de diferentes limitaciones y medios de representación. También argumentamos que la consecuente teoría termodinámica se hizo posible a través de la construcción de este modelo, y no al revés, lo que subraya la importancia epistémica de construir modelos y trabajar con ellos.

3.- DESARROLLO Y USOS EPISTEMICOS DE MODELOS CIENTIFICICOS: EL CASO DEL MODELO CARNOT DE UN MOTOR DE CALOR

El motor térmico es un ejemplo clásico de un dispositivo tecnológico que fue objeto de modelado científico. Analizaremos más de cerca cómo Carnot y sus sucesores desarrollaron el modelo Carnot del motor térmico. Con este análisis pretendemos ilustrar que un enfoque pragmático, nos presenta una imagen más adecuada de los modelos y su modelización, que una visión representacional paradigmática, en particular en lo que respecta a cómo, en las prácticas científicas reales, los modelos están justificados y por qué nos dan conocimiento. Las Reflexiones de Carnot sobre el poder del fuego [1824/1986] son particularmente interesantes como un caso de modelado científico en las ciencias de la ingeniería porque el tratado de Carnot describe cómo paso a paso desarrolla una interpretación teórica de un dispositivo tecnológico. Sus escritos exponen el proceso de razonamiento exploratorio por el cual se construyen diferentes aspectos en el modelo científico, lo que ilustra cómo se construyó y justificó. Los artículos científicos en nuestros días a menudo ocultan partes importantes del proceso de razonamiento por el cual se desarrolló el modelo. Nersessian y Patton (esta compilación), por ejemplo, describen meticulosamente muchos de los aspectos que los científicos tienen en cuenta en el desarrollo de sus modelos, muchos de los cuales no formarán parte de artículos científicos de estos científicos. Además del hecho de que Carnot expone cómo desarrolló el modelo, el modelo Carnot del motor térmico es un buen caso porque es menos complejo que muchos de los atractivos casos modernos en las ciencias de la ingeniería. Aunque histórico, todavía ilustra cómo las ciencias de la ingeniería abordan los problemas tecnológicos. Además, es mejor que los ejemplos modernos porque muchos estudiosos de la filosofía de la tecnología ya están familiarizados con el modelo Carnot (cf. [Kroes, 1995]). Por último, pero no menos importante, tomamos en cuenta que, a pesar del enorme aumento del conocimiento científico, las técnicas matemáticas y computacionales, y los instrumentos científicos, la forma en que los científicos desarrollan modelos científicos de dispositivos no ha cambiado fundamentalmente.

3.1 El modelo Carnot del motor térmico

Según la visión de representación, el modelo Carnot del motor térmico es un modelo científico que representa el motor térmico real. Nuestra visión pragmática, por el contrario, se centra en el modelado y no sólo en las entidades llamadas modelos, lo que también hace lugar para el papel de los científicos y sus propósitos epistémicos en la contabilidad del valor epistémico de los modelos. Desde esta perspectiva, el modelo de Carnot es una entidad construida, que ofrece una interpretación teórica del motor térmico en vista de propósitos epistémicos particulares. Uno de esos propósitos importantes era identificar los límites teóricos del rendimiento (eficiencia, en términos modernos) del motor térmico. El giro hacia el modelaje implica, por lo tanto, una noción extendida de un modelo: los modelos pueden considerarse entidades en desarrollo construidas por científicos con diversos medios de representación, en los que se incorporan los fines epistémicos y otros ingredientes. Estos aspectos de un modelo no se revelarán a los no expertos, sin embargo, sin ellos el modelo no puede ser entendido, y mucho menos utilizado. Por lo tanto, un modelo no debe reducirse ni a la descripción del modelo ni a la entidad imaginaria configurada por esta descripción, sino que implica ambos. Lo que crea entre los dos y media entre ellos es la actividad humana del modelado. Otros aspectos que están incorporados en los modelos en el proceso de modelado son: 1) las idealizaciones, abstracciones y simplificaciones que hacen que el sistema objetivo real sea inteligible y viable, (2) el fenómeno (teórico) en el que el problema original era traducido, (3) las formas de representación particulares con la ayuda de las cuales está representado el sistema objetivo imaginario (o hipotético), (4) los conocimientos experienciales y teóricos utilizados en su desarrollo y justificación, (5) los nuevos conceptos y principios que pueden surgir en su desarrollo, y (6) los parámetros observables o medibles pertinentes del sistema objetivo real que vinculan el modelo científico con el sistema objetivo real. Con nuestro análisis del modelo Carnot, pretendemos mostrar que no se reduce ni a un diagrama ni a una teoría o una entidad imaginaria, sino que consiste en aspectos diversos que los científicos han incorporado en él en el proceso de modelado. Afirmamos que este contenido intrincado de modelos científicos, que por lo general sólo es entendido por los científicos que trabajan en el campo en cuestión, hace que los modelos funcionen como herramientas epistémicas.

Además, desde la perspectiva de los modelos esbozados anteriormente, los modelos pueden abordarse como entidades en evolución histórica: en qué consiste el modelo, cómo se representa su contenido y cómo se puede utilizar el modelo para generar conocimiento, también se puede desarrollar a lo largo del curso del tiempo. En una vista de representación, este cambio de contenido del modelo es problemático porque el modelo Carnot no tendría un referente claro. En una visión pragmática, este cambio de contenido no es problemático. El modelo Carnot "mantiene este contenido unido" y lo que permanece estable en su desarrollo es (1) la interpretación teórica del motor térmico y (2) el propósito epistémico de encontrar los límites teóricos del rendimiento de los motores térmicos.

Desde el punto de vista filosófico, un problema aparente del enfoque pragmático, consiste en explicar cómo los modelos nos dan conocimiento, y no mediante una relación de representación predeterminada con el sistema objetivo real. Un objetivo importante de nuestro análisis del desarrollo del modelo Carnot es, por lo tanto, ilustrar cómo al concebir modelos como herramientas epistémicas (como se presenta en la Sección 2.2,) hace que sea inteligible cómo se justifican los modelos y cómo nos dan conocimiento. La clave de esta pregunta reside en la actividad de modelización. A medida que los modelos están diseñados a propósito, permiten a los científicos interactuar con ellos, lo que se ofrece y se limita por los medios representativos que hacen uso de ellos (que por lo tanto determinan en parte lo que se puede hacer con el modelo y lo que no; ejemplos de los medios representativos son texto, imágenes, diagramas, gráficos, tablas, ecuaciones matemáticas, simulaciones por ordenador). Además, pretendemos demostrar que los modelos científicos no son sólo herramientas epistémicas para fines de razonamiento científico, construcción teórica o diseño de otros artefactos e instrumentos, los modelos también funcionan como herramientas epistémicas de su propia fabricación. Los científicos desarrollan un modelo paso a paso, construyendo en nuevos aspectos por los cuales el contenido del modelo se vuelve más rico y más avanzado. Como herramienta epistémica, «ofrece y limita» también su propio desarrollo, lo que explica por qué parte de la justificación de un modelo es "incorporado": el desarrollo y la justificación de un modelo suelen considerarse como piezas de conocimiento ya aceptadas y las convencionales formas de representarlos se incorporan al modelo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el propio Carnot no llamó a su relato teórico del motor térmico un modelo. La noción de un modelo científico en su sentido actual no estaba en uso esos días (cf. [Bailer-Jones, 1999]). Por lo tanto, sólo con el beneficio de la retrospectiva, la comunidad científica lo llama un modelo del motor térmico. Se puede argumentar que la actividad teórica había tomado la forma de modelar hacia finales del siglo XX, modelándose a sí misma llevando "una firma histórica distintiva" (como Peter Godfrey-Smith, [2006, 726]). Ciertamente, la estrategia teórica de las ciencias de la ingeniería consiste en el modelado. Por último, pero no menos importante, dado que nuestros objetivos son filosóficos, nuestro análisis es esencialmente reconstructivo al tratar de resaltar cómo el desarrollo y el uso de modelos pueden darnos conocimiento. Aunque presentaremos hechos históricos, no nos esforzamos por presentar un relato histórico de cómo Carnot y sus sucesores desarrollaron realmente el modelo Carnot.

3.2 Propósito epistémico del modelo Carnot

El físico e ingeniero francés Sadi Carnot, en sus Reflexiones sobre el poder del fuego móvil [1824/1986], dio el primer relato teórico exitoso de los motores térmicos, al que nos referiremos como 'el modelo Carnot del motor térmico'. Carnot abre sus Reflexiones con la declaración: "Generalmente se sabe que el calor puede ser la causa del movimiento y que posee un gran poder motriz. La máquina de vapor en uso generalizado hoy en día son prueba visible de esto"(p. 61). Acredita a ingenieros ingleses como Savery, Newcomen, Smeathon y Watt para el descubrimiento, desarrollo y mejora del motor térmico (pág. 63). La Figura 1 presenta una imagen de los principios mecánicos de uno de los primeros motores de vapor, el motor de vapor Newcomen, inventado en 1712 por Thomas Newcomen.

Según Carnot: "El estudio de estos motores es de sumo interés porque su importancia es inmensa, y su uso está aumentando a diario" (ib. p. 61.) A continuación, afirma el problema y por qué se necesita una teoría de su funcionamiento:

> A pesar de los avances del hombre y que se han hecho con el motor térmico, y el estado satisfactorio en el que existe hoy en día, la teoría de su funcionamiento es rudimentaria, y los intentos de mejorar su rendimiento, todavía se hacen de una manera casi azarosa.
>
> La cuestión de si la potencia motriz del calor [es decir, el efecto útil que un motor es capaz de producir] es limitada, o si es ilimitado se ha discutido con frecuencia. ¿Podemos establecer un límite a la mejora del motor térmico, un límite que, por la propia naturaleza de las cosas, no puede ser superado de todos modos? O por el contrario, ¿es posible que el proceso de mejora se vaya indefinidamente? Durante mucho tiempo también ha habido intentos de descubrir si podría haber sustancias de trabajo preferibles al vapor para el desarrollo del poder motriz del fuego; y esa es una cuestión que todavía se debatió hoy. ¿Podría el aire, por ejemplo, tener grandes ventajas a este respecto? En las páginas siguientes, proponemos examinar estas preguntas cuidadosamente. (ibíd. p. 63)

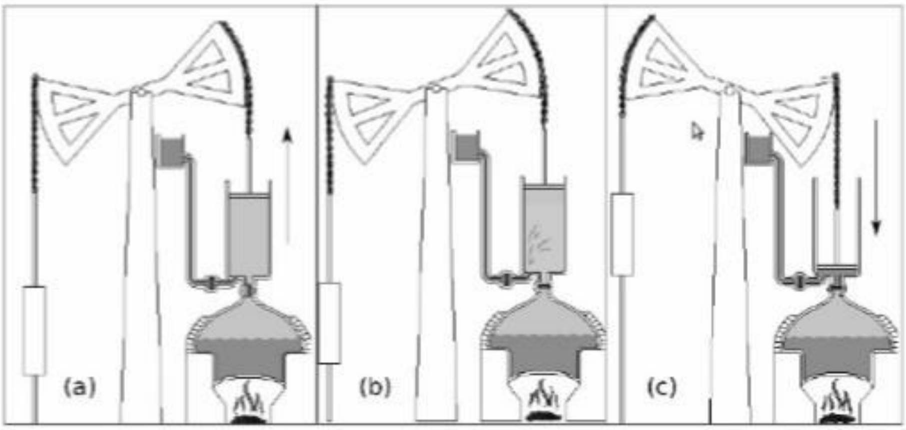


Figura 1. La máquina de vapor de Newcomen que presenta los esquemáticos de sus Principios mecánicos. El vapor es de color gris claro y el agua es de color gris oscuro. Las válvulas entre la caldera y el condensador (el cilindro) se mueven de abierta a cerrada. Este esquema presenta tres momentos diferentes de un ciclo. (a) La válvula entre la caldera y el cilindro está abierta. El vapor de la caldera entra en el cilindro y empuja el pistón hacia arriba. (b)El Pistón ha llegado a su posición más alta. La válvula entre el cilindro y la caldera está

cerrada. Válvula entre el fregadero frío y el cilindro se abre y el agua de un depósito de aerosoles de agua fría en el cilindro causando condensación de vapor en el cilindro. (c) Ambas válvulas están cerradas. El pistón se mueve hacia abajo, lo que se debe a su propio peso y a la presión reducida de vapor en el cilindro. En la posición más baja se abre la válvula entre la caldera y el cilindro. El agua vuelve a la caldera. Repeticiones de ciclo. Figura tomada de http://en/wikipedia.org/wiki/Newcomen motor de vapor

Esta introducción de Carnot a su trabajo teórico ilustra que, a diferencia de muchas de las ciencias "básicas", las ciencias de la ingeniería suelen partir de cuestiones relacionadas con problemas prácticos y aplicaciones, por ejemplo, el problema de cómo el funcionamiento de un dispositivo se puede mejorar. Uno de los problemas tecnológicos de las máquinas de vapor a principios del siglo XIX fue cómo mejorar su rendimiento, lo que significaba cómo reducir la cantidad de carbón necesaria para producir una cantidad de energía motriz. Esta medida del trabajo (ahora llamado "eficiencia") de las máquinas de vapor, se expresaba como las libras de agua que se bombeaban a una altura de pie por bushel de carbón. Los ingenieros querían saber si el rendimiento de las máquinas de vapor podía mejorarse mediante el uso de vapor a una presión más alta y/o reemplazando el vapor por otros vapores o gases. Carnot tradujo el problema práctico de cómo mejorar el rendimiento de estos motores, a una pregunta teórica sobre los límites al rendimiento del motor térmico determinado «por la propia naturaleza de las cosas».

Generalmente, el primer paso en el desarrollo de un modelo científico de un dispositivo como el motor térmico, implica el concebir su funcionamiento en términos de fenómenos físicos particulares que producen su correcto o mal funcionamiento. Carnot asumió que "para comprender de manera completamente general el principio que rige la producción de movimiento por calor, es necesario considerar el problema independientemente de cualquier mecanismo o sustancia de trabajo en particular"(ibíd. p. 64). Por lo tanto, Carnot concibió el funcionamiento del motor térmico, no principalmente en términos de su funcionamiento mecánico como se representa en la Figura 1, sino como un dispositivo que produce movimiento por calor.

El fenómeno de interés producido por el motor térmico, según Carnot, es "la producción de movimiento por calor". Esta concepción del fenómeno de interés ya forma parte del desarrollo del modelo científico, porque este fenómeno no se observa simplemente, sino que lo disciernen o conceptualizan los científicos. En consecuencia, la descripción del fenómeno no puede entenderse fácilmente como una representación que se encuentra en una relación de correspondencia o similitud con el sistema de destino real (por ejemplo, el motor de vapor). Más bien, presenta una forma particular de "ver" o "imaginar" el dispositivo real. En los escritos de Carnot, se pueden encontrar muchos otros ejemplos de concepciones de fenómenos que él discierne y que funcionan como herramientas epistémicas para el desarrollo del modelo científico en lugar de ser afirmaciones sobre fenómenos que existen o podrían ser observados de alguna manera en el motor de calor real. Ejemplos son: el fenómeno que es una diferencia en la temperatura de dos cuerpos A y B potencia motriz; y el fenómeno que, "una transferencia calórica de A a B produce potencia motriz". Un científico que postula un fenómeno no está obligado a creer que existe como una ocurrencia real (ontológica) que podría observarse si tuviéramos mejores instrumentos. En su lugar, un científico debe tener razones para creer que el modelo puede ser utilizado como una herramienta epistémica en el razonamiento sobre el sistema objetivo real, en particular con respecto al propósito epistémico del modelo.

En resumen, la producción del modelo Carnot preliminar, requiere el concebir el motor térmico real en vista del propósito epistémico del modelo. Imaginarlo de esa manera implica conocimientos empíricos y teóricos relevantes que permiten hacer abstracciones y conceptualizar características particulares del sistema objetivo real en vista del propósito epistémico. Este primer paso de modelado da como resultado un modelo preliminar de Carnot que consiste en la concepción del motor térmico real como un dispositivo abstracto que produce movimiento por calor. Claramente, el modelo aún no es satisfactorio ya que no explica suficientemente los límites teóricos del rendimiento de este dispositivo. Sin embargo, el modelo preliminar del motor térmico real debe ser tal que permita (es decir, ofrece y limita) un mayor desarrollo del modelo Carnot.

3.3 Modelado de un dispositivo hipotético

El desarrollo del modelo Carnot del motor térmico procede desentrañando el dispositivo abstracto que produce movimiento por calor en términos de un modelo preliminar. Reflexionando, Carnot describe un dispositivo hipotético que produce el fenómeno de interés, es decir, "movimiento por calor". El dispositivo hipotético consiste en un recipiente cilíndrico cerrado con un pistón móvil que cierra una cantidad constante de gas; este gas puede ser aislado térmicamente, o contactado con un cuerpo a una temperatura alta constante que actúa como una fuente de calor, o con un cuerpo a una temperatura baja constante que actúa como disipador de calor. Este dispositivo produce movimiento por calor porque pasa por un ciclo específico por el cual el pistón se mueve hacia arriba y hacia abajo. Carnot describe el funcionamiento de este dispositivo hipotético de la siguiente manera, haciendo uso del diagrama en la Figura 2:

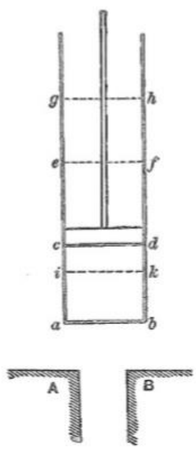


Figura 2. Sección transversal axial del dispositivo hipotético, que forma parte del modelo Carnot del motor térmico. En este diagrama, abcd es un recipiente cilíndrico, cd es un pistón móvil, A y B

son cuerpos de temperatura constante. El recipiente puede ser puesto en contacto con el cuerpo o retirado de ambos (como está aquí). Figura tomada de [Carnot, 1824,p. 17].

Imaginemos un fluido elástico, aire por ejemplo, encerrado en el recipiente cilíndrico abcd en la Figura 3 [véase la figura 2 a continuación]. En esta figura, cd es un diafragma móvil o pistón instalado dentro del cilindro, y los dos cuerpos A y B se mantienen cada uno a una temperatura constante, la de A es mayor que la de B. Imaginemos ahora la siguiente secuencia de operaciones:

> (1) El cuerpo A se pone en contacto con el aire encerrado en el volumen abcd, ... Como resultado de este contacto, el aire asume la temperatura del cuerpo A. En este punto, cd marca la posición real del pistón.
>
> (2) El pistón se eleva gradualmente hasta la posición ef. El contacto entre el cuerpo A y el aire se mantiene en todo el cuerpo, de modo que la temperatura del aire permanece inalterada durante la expansión. El cuerpo A proporciona el calórico que se necesita para mantener la temperatura constante.
>
> (3) Se retira A, de modo que el aire ya no esté en contacto con nadie que pueda actuar como fuente de calorías. Pero el pistón sigue moviendo, subiendo de la posición ef a gh El aire se expande sin absorber calórico, y su temperatura baja. Supongamos que la temperatura sigue cayendo hasta que es igual a la de B, con lo cual el pistón se detiene en la posición gh.
>
> (4) El aire se pone en contacto con el cuerpo B. A continuación, se comprime devolviendo el pistón de su posición gh a cd. Durante este proceso, el aire mantiene una temperatura constante, ya que permanece en contacto con B y le da calor.
>
> (5) Se quita el cuerpo B y se continúa con la compresión del aire. Dado que el aire está ahora aislado, su temperatura aumenta. La compresión continúa hasta que la temperatura del aire alcanza la del cuerpo A, momento en el que el pistón se ha movido de la posición de cd a ik.
>
> (6) El aire se coloca una vez más en contacto con el cuerpo A, y el pistón vuelve de ik a ef; la temperatura permanece constante.
>
> (7) La tercera de las etapas que se acaba de describir se repite, seguida de las etapas 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5 y pronto." (ibíd. p. 74-75, nuestra cursiva)

Por lo tanto, Carnot desarrolló el modelo preliminar construyendo en esta concepción más extendida de un dispositivo que produce movimiento por calor. En lenguaje moderno, las etapas sucesivas en el funcionamiento del dispositivo se denominan ciclo termodinámico o Carnot. Una vez que el ciclo está 'en marcha', la operación (6) reemplaza (1) y (2), por lo tanto, el ciclo consta en realidad de cuatro operaciones: 3, 4, 5, 6. En consecuencia, el dispositivo hipotético produce un fenómeno termodinámico (como ahora lo llamamos), que es "la producción de movimiento por calor".

3.4 Vistas representacionales versus pragmáticas en modelos.

La concepción de Carnot del funcionamiento de un dispositivo hipotético que produce movimiento por calor, también implica varios otros aspectos. En primer lugar, explica cómo las operaciones con este dispositivo hipotético (como el espaciado del aire en contacto con el cuerpo A o B, o la compresión del aire en el cilindro) producen fenómenos observables y medibles (como cambios en la temperatura, la presión y el volumen del aire en el cilindro). Así es como el modelo Carnot da conocimiento de parámetros observables y medibles. Como consecuencia, el modelo Carnot está conectado con el sistema objetivo del mundo real mediante parámetros observables y medibles que implica el modelo, mientras que una visión de representación de los modelos atribuiría esta conexión a la relación de presentación son relación de presentación entre el modelo y el motor térmico real como está en sí mismo, que, con el modelo en su estado dado, es difícil de imaginar.

En segundo lugar, el modelo implica fenómenos imaginarios que no podrían ser observados o medidos (como la transferencia de calorías). Tales descripciones de fenómenos imaginarios en el modelo no podrían justificarse como parte del modelo si su justificación dependiera de una relación de representación con ocurrencias observables o medibles. Desde la perspectiva pragmática, la posición de fenómenos imaginarios está justificada si permite un razonamiento adicional, siempre y cuando no genere contradicciones. De hecho, la concepción de la "transferencia calórica" fue rechazada más tarde, pero no porque de alguna manera se descubriera que el calórico no existía, sino porque el razonamiento sobre ella conducía a contradicciones.

Además, es obvio que el modelo Carnot, que, junto al dispositivo hipotético (operaciones 3, 4, 5, 6) incluye un diagrama de este dispositivo (Figura 2), no representa el funcionamiento mecánico del motor térmico real como se describe y se muestra en la Figura 1. Además, la concepción de Carnot descuida intencionadamente todas las posibles pérdidas de energía en un motor térmico real, debido al trabajo mecánico del mismo, como la pérdida por fricción del pistón en movimiento, la pérdida de vapor más allá del pistón y la pérdida de calor por conducción entre piezas del motor a diferentes temperaturas. Carnot asumió que estas pérdidas debían descuidarse para llegar a un modelo que explique un límite al rendimiento de los motores térmicos que, por la propia naturaleza de las cosas, no pueden ser superados. Por lo tanto, el propósito epistémico del modelo Carnot justificaba el abandono del funcionamiento mecánico y las deficiencias conexas del motor térmico real.

Por último, en los relatos modernos del modelo Carnot, el dispositivo hipotético que produce movimiento por calor a menudo se llama el motor térmico ideal. Estas cuentas suelen abarcar la idea de que el modelo Carnot es el motor térmico ideal, lo que nos lleva a considerar los modelos como entidades abstractas (para modelos como entidades abstractas, véase [Giere, 1999]). Sin embargo, esto parece agravar el problema filosófico de la representación: ¿Cómo se supone que relacionamos una entidad imaginaria con un sistema objetivo real? Sobre todo porque la vista de representación permanece en silencio sobre los medios reales de representación. Concebir modelos como herramientas epistémicas presta una atención explícita al uso de medios de representación externos, atribuyéndose a esta dimensión de modelar parte de su valor epistémico. Cuando se da cuenta de que los modelos se utilizan para hacer inferencias y razonamiento, la urgencia de poner a tierra el valor epistémico de los modelos a una supuesta relación de representación entre el modelo y algún sistema de destino externo (o su representación en términos de un modelo de datos) se desvanece. En su lugar, los resultados de un modelo y su comportamiento están relacionados con mediciones, resultados experimentales y otros conocimientos teóricos existentes en un proceso sutil de triangulación.

Desde la perspectiva pragmática la modelización procede ciertamente mediante la representación, es decir, el uso de medios representativos para transmitir y crear significado, sin embargo, esto no tiene por qué establecer ninguna relación determinante y representativa entre algún sistema real (o su representación) y el sistema hipotético así introducido. Por lo tanto, cuando el modelado implica la construcción de un objeto imaginario, uno no tiene que asumir que para que nos proporcione conocimiento según ella necesitaría replicar con precisión algunos aspectos de algunos sistemas de destino reales. El valor epistémico del modelado se explica haciendo referencia a las características de la herramienta como de los modelos en lugar de referirse a las supuestas relaciones de representación. En resumen, aunque los modelos se construyen haciendo uso de medios representativos, no es necesario que se conciban como representaciones de ningún sistema objetivo real definido. Sin embargo, como argumentados anteriormente, los análisis pragmáticos de representación muestran que la invocación de la representación no establece en sí mismo en lo que respecta al valor epistémico (o cognitivo) de los modelos.

En las secciones anteriores tomamos el modelo Carnot del motor térmico como nuestro ejemplo práctico por el cual nos propusimos argumentar e ilustrar que el enfoque pragmático conduce a un relato más inteligible de la modelización en las ciencias de la ingeniería que el paradigma representativo. El resto de esta Sección tiene por objeto reconstruir con más detalle cómo se desarrolló el modelo Carnot del motor de calor y, en particular, cómo Carnot y sus sucesores construyeron, paso a paso, diversos aspectos de su modelo, como principios experiencial y teórico y conceptos teóricos, y utilizando nuevos medios de representación, por el cual el proceso el modelo también estaba parcialmente justificado. Además, nuestro objetivo es responder por qué y cómo el modelado en este caso, que aparentemente procede a través de desvío de un dispositivo hipotético muy alejado de los motores de calor reales, sin embargo nos da conocimiento sobre ellos. En las Secciones 3.5 y 3.6, ilustraremos en primer lugar, que el desarrollo del modelo del motor térmico por parte de Carnot y sus sucesores también se llevó a cabo en conjunto con el desarrollo de los medios de representación y conceptos teóricos utilizados.

3.5.- Medios representativos para desarrollar el modelo Carnot

Un aspecto importante del desarrollo de modelos científicos es la representación de los medios que los científicos tienen a su disposición. Los medios representativos proporcionan la encarnación material del modelo que proporciona su cohesión espacial y temporal en la que los científicos pueden trabajar.

A partir de las Reflexiones de Carnot, se hace obvio que los medios representativos de Carnot eran limitados. El uso de representaciones diagramáticas y matemáticas tal como las conocemos hoy en día habría hecho que su laborioso razonamiento sea mucho más fácil para él, y más accesible para el lector. Carnot sólo utiliza texto, algunas ecuaciones y cálculos, y algunas tablas con datos experimentales y cálculos de fórmula. El único tipo de diagrama que presentó es la Figura 2. Sólo los sucesores de Carnot desarrollaron varios medios representativos que permitieron la reformulación y el desarrollo del modelo Carnot en la forma tal como la conocemos hoy en día. La Figura 3, por ejemplo, es un diagrama de bloques moderno del fenómeno (es decir, la producción de movimiento por calor). Este diagrama moderno representa el motor térmico como un dispositivo que convierte el calor en trabajo mecánico, donde el calor, Q, fluye desde un horno (por ejemplo, una caldera) a alta temperatura TH a través del fluido del "cuerpo de trabajo" (por ejemplo, vapor o aire) y en el disipador frío (por ejemplo, un condensador) en TC, obligando así a la sustancia de trabajo a realizar trabajos mecánicos, W, en el entorno, a través de ciclos de compresiones y expansiones del fluido. Es sorprendente que Carnot no utilizara símbolos (H y Q) en la representación del fenómeno ni flechas para representar las direcciones de trabajo y calor entre los cuerpos.

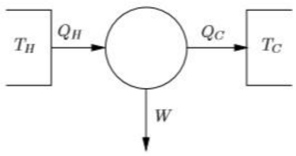


Figura 3. Un diagrama moderno del motor Carnot, que presenta la producción de trabajo por calor. En una concepción moderna, el motor térmico idea l de Carnot produce trabajo, W, por calor, Q, por medio de un ciclo termodinámico de un gas contactado con un depósito caliente a temperatura TH, y un depósito frío a temperatura TC. Este ciclo ahora se llama el ciclo Carnot (véase también el cuadro 4). La figura es una adaptación del motor de calor http://en.wikipedia.org/wiki/Carnot.

Al igual que en la Figura 3, el diagrama superior de la Figura 4 muestra un medio de representación moderno para representar la "operación" del motor térmico ideal, que se expande en el diagrama de Carnot (Figura 2). Las imágenes (1), (2), (3), (4) de este diagrama de bloques representan el funcionamiento del motor térmico ideal, es decir, las cuatro 'operaciones' 6, 3, 4, 5, respectivamente, descritas por Carnot (es decir, las cuatro etapas de un ciclo termodinámico del gas en un cilindro con un pistón de libre movimiento). Aquí también la presentación de Carnot se enriquece con el uso de flechas (mientras que podría haber sido enriquecida con el uso de los símbolos Q y W también): flechas hacia arriba y hacia abajo dentro del cilindro representan el calor que fluye dentro y fuera del cilindro, respectivamente, mientras que hacia arriba y hacia arriba flechas hacia abajo fuera del cilindro representan el trabajo ejercido por, y en el pistón, respectivamente.

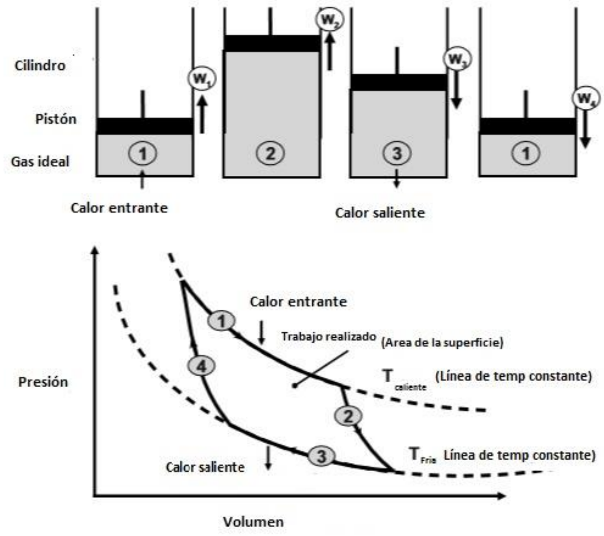


Figura 4. Un diagrama moderno del dispositivo hipotético que produce movimiento a partir del calor. El diagrama superior presenta la "operación" del dispositivo, que es un cilindro lleno de una cantidad constante de gas (gris oscuro) y cerrado con un pistón móvil. Las imágenes de este diagrama, numeradas (1), (2), (3), (4) representan respectivamente las cuatro 'operaciones' 6, 3, 4 y 5 descritas por Carnot [1824/1986, 74-75]. El diagrama inferior presenta el diagrama P-V del ciclo Carnot.

Otro tipo importante de diagrama que pasó a formar parte del modelo Carnot sólo después de que Carnot publicara sus Reflexiones, fue inventado por Benoît Paul Emile Clapeyron, también un ingeniero y físico francés, que, diez años más tarde, presentó el ciclo como una curva cerrada en un gráfico de la presión P del gas en el cilindro contra su volumen V. En la actualidad, este gráfico, del cual se presenta una versión en el diagrama inferior de la Figura 4, se denomina diagrama P-V del ciclo Carnot. Además, las concepciones modernas de el motor térmico ideal amplían la descripción del ciclo de Carnot, es decir, las "operaciones" descritas en 6,3,4,5 mediante la introducción de nuevos conceptos termodinámicos, como la «expansión isotérmica reversible», que sólo fueron desarrollados por los sucesores de Carnot. Estos nuevos conceptos permitieron una descripción más eficiente y precisa del ciclo de Carnot.

Hoy, el ciclo Carnot se describe de la siguiente manera (los números 1, 2, 3, 4 en esta descripción se refieren a los números de los dos diagramas de la Figura 4):

1. (Operación 6 de Carnot) Expansión isotérmica reversible del gas a la temperatura "caliente", T_C (es decir, adición de calor isotérmico). La expansión del gas es impulsada por la absorción de calor Q_1 del depósito de alta temperatura. Durante este paso, el gas en expansión hace que el pistón haga el trabajo W_1 en el entorno.

2. (Operación 3 de Carnot) Expansión adiabática reversible (es decir, isentrópico) del gas (es decir, no se transfiere calor hacia o desde el gas en el cilindro: $Q_2 = 0$). En este paso el pistón y

el cilindro están aislados térmicamente, por lo que no se gana ni se pierde calor. El gas continúa expandiéndose, haciendo el trabajo W_2 en los alrededores. La expansión del gas hace que se enfríe a la temperatura "fría", T_F.

3. (Operación 4 de Carnot) Compresión isotérmica reversible del gas a la temperatura "fría", T_F (es decir, rechazo de calor isotérmico). Durante este paso, el entorno trabaja W_3 en el gas, haciendo que el calor Q_3 fluya fuera del gas al depósito de baja temperatura.

4. (Operación 5 de Carnot) Compresión adiabática reversible (es decir, isentrópica) del gas (es decir, no se transfiere calor hacia o desde el gas en el cilindro: $Q_4 = 0$). El pistón y el cilindro están aislados térmicamente. Durante este paso el entorno funciona W_4 en el gas, comprimiéndolo y haciendo que la temperatura suba a T_C. En este punto el gas está en el mismo estado que al comienzo de este ciclo.).

Finalmente, los nuevos enfoques matemáticos pasaron a formar parte del modelo Carnot a través del trabajo de Rudolf Julius Emanuel Clausius, un físico y matemático alemán, quien en 1865 publicó La Teoría Mecánica del calor, con sus aplicaciones a la máquina de vapor y para Propiedades físicas de los cuerpos. Además de otras cosas, desarrolló un modelo de conversión del calor, Q, para trabajar, W, mediante el uso del cálculo diferencial como medio representativo para representar el ciclo de Carnot. Este nuevo medio representativo permite, por ejemplo, describir matemáticamente los procesos reversibles. En el primer capítulo (Introducción Matemática), Clausius explica el aparato matemático. En capítulos posteriores desarrolla la "teoría mecánica del calor" utilizando este aparato para construir ecuaciones matemáticas que representan, por ejemplo, el ciclo Carnot. Por lo tanto, el ciclo del gas en el motor térmico propuesto por Carnot fue representado de una manera completamente nueva, y el modelo matemático resultante ofrece y limita nuevas formas particulares de razonamiento y manipulación con el modelo. Tales invenciones de medios de representación no sólo mejoraron la comprensión, sino que también desempeñaron un papel indispensable en el desarrollo del modelo Carnot a modelos cada vez más claros y ricos de motores térmicos por parte de sus sucesores.

3.6 Conocimientos teóricos y conceptos para desarrollar el modelo Carnot

Para entender la forma de razonar de Carnot en el desarrollo del modelo, también debemos dominar algunos de los conocimientos teóricos y experimentales con los que estaba familiarizado, así como conceptos que eran desconocidos para él, mientras que si lo son para nosotros. Un esquema se presenta sólo en la medida en que ayuda a ilustrar cómo el conocimiento en el momento (y la falta de él), es parte de cómo se desarrolla el modelo; de ninguna manera pretende presentar un esquema completo.

Importante es la concepción del calor. En la época de Carnot, la teoría predominante del calor era la teoría del calórico que suponía que el calor era una especie de fluido invisible sin peso que fluía de cuerpos más calientes a más fríos. También se asumió que el calórico es una sustancia, que, como la materia, es Indestructible. Sólo a mediados del siglo XIX la teoría calórica fue reemplazada por una teoría del calor (usando la noción "cantidad de calor", conocida como Q) debido al trabajo de científicos como Clausius, James Joule, William Thomson (Lord Kelvin), y James Clerk Maxwell. Clausius y Thomson rechazaron la idea de que el calor es una sustancia (es decir, calórica), porque condujo a contradicciones en el modelo Carnot. Clausius explica: "El calor no es una cantidad variable; Pero... cuando el trabajo mecánico es producido por calor, el calor debe ser consumido, y que, por el contrario, por el gasto de trabajo se puede producir una cantidad correspondiente de calor." Por lo tanto, en la nueva teoría mecánica del calor, la naturaleza del calor "no es una sustancia, sino más bien como un movimiento". Clausius argumenta que "Según esta teoría, la relación causal implicada en el proceso de producción de trabajo por calor es muy diferente de la que Carnot asumió. El trabajo mecánico se deriva de la conversión del calor existente en trabajo, de la misma manera que, por las leyes ordinarias de la mecánica, la fuerza se supera, y el trabajo se produce así" [Clausius, 1865,p. 268]. Por lo tanto, mientras que Carnot creía que el trabajo se produce por la caída de una cantidad de calor de una temperatura más alta a una temperatura más baja, la teoría mecánica del calor argumenta que el trabajo se produce por movimiento.

Un breve intermezzo sobre este cambio de la teoría del calor, puede ilustrar un poco más por qué es importante entender los modelos científicos en términos de cómo los científicos interpretan y estructuran lo que observan o experimentan (cf. Boon). Carnot y sus predecesores interpretaron el calor como una sustancia. Adoptar la idea de que el calor es una sustancia significa que uno 'imagina' el calor como una cosa indestructible. Posteriormente, utilizaron esta concepción del calor en su razonamiento y modelado posterior. Carnot imaginó así el calor como un fluido que puede ser transportado de un cuerpo a otro (donde es transportado por otros fluidos como el vapor), sin ser consumido o producido. Reemplazar esta concepción del calor por la idea de que el calor es movimiento que actúa como una fuerza es un tremendo logro intelectual. Obviamente, Clausius y otros sucesores de Carnot no observaron que el calor en realidad no parece ser una sustancia, sino un movimiento; en cambio, encontraron esta concepción más asertiva.

En el desarrollo del modelo, también se construyeron conocimientos experienciales y teóricos. Carnot estaba familiarizado con las leyes de gas de Boyle-Marriote (que establece que a temperatura constante, la presión absoluta y el volumen de gas son inversamente proporcionales), la ley Charles (que establece que a presión constante, el volumen de una cantidad dada de gas y la temperatura en Kelvin son proporcionales), la ley de Gay Lussac (que establece que la presión de una cantidad fija de gas a un volumen fijo es proporcional a su temperatura en Kelvin), y la ley de Dalton (que establece que la presión total ejercida por una mezcla gaseosa es igual a la suma de las presiones parciales de cada componente individual en una mezcla de gas). Véase [Carnot, 1824/1986, p. 78]. La ley de gases ideal tal como la conocemos hoy en día, y que incluye el principio de Avogadro (que afirma que los volúmenes iguales de gases ideales o perfectos, a la misma temperatura y presión, contienen el mismo número de partículas, o moléculas), sólo fue declarado por Clapeyron en 1834 (es decir, después de la publicación de la obra de Carnot).

En ese momento (alrededor de 1824), las leyes básicas de la termodinámica tampoco habían sido formuladas. Sin embargo, Carnot es a menudo llamado el padre de la termodinámica. Alrededor de 1850, Clausius y Thomson formularon la primera y la segunda ley de la termodinámica (abandonando la teoría calórica), que establece:

(1) la conservación de la energía, y

(2) que el calor de sí mismo no puede pasar de un cuerpo más frío a un cuerpo más cálido (formulado por Clausius [1854, p. 116; 1865, p. 270]);

La versión moderna de la segunda ley dice lo siguiente: la entropía de un sistema aislado que no está en equilibrio tenderá a aumentar con el tiempo, acercándose a un valor máximo en equilibrio. Esta noción de entropía no era conocida por Carnot, sino desarrollada y nombrada por Clausius, quien, además de otras cosas, quería entender de una manera fundamental por qué "el calor no puede pasar de un cuerpo más frío a un cuerpo más cálido". Introdujo este concepto con el fin de tener en cuenta la pérdida de calor cuando "el calor de una temperatura se transforma en el calor de otra temperatura" (ibid p.217, y p. 357). La entropía, S, de un cuerpo es la relación entre el calor, Q, y la temperatura, T, mientras que el cambio de entropía es el uso de energía disipativa, o pérdida de calor irreversible, durante un cambio de estado:

$$\Delta S=Q(1/T_2-1/T_1).$$

Por ejemplo, los argumentos para el teorema de que la magnitud del trabajo producido es "independiente de la naturaleza de las sustancias a través de las cuales se realiza la producción de trabajo y la transferencia de calor." La prueba de Carnot de la necesidad de tal relación se basa en el axioma de que es imposible crear una fuerza móvil de la nada, o en otras palabras, que el movimiento perpetuo es imposible. (cf. [Carnot, 1824/1986, pp. 69-70; Clausius, 1865, pág. 268].)

3.7 Por qué y cómo el modelo Carnot de motores térmicos produce conocimiento

Al explorar por qué y cómo el modelo Carnot da conocimiento, nos centraremos en la pregunta de cómo Carnot llegó a la descripción del motor ideal térmico (presentado en la Sección 3.3), que él muestra como una cantidad fija de aire en un cilindro cerrado con un pistón que realiza "una secuencia de cuatro operaciones"3 , 4, 5, 6. En nuestra reconstrucción, ignoraremos muchos de los argumentos refinados e inteligentes de Carnot; También ignoraremos los argumentos que se basan en su concepción del calor como sustancia indestructible (es decir, su uso de 'calórico').

En consecuencia, nuestra reconstrucción del modelado de Carnot vuelve al preliminar modelo Carnot del motor térmico, que implica el dispositivo abstracto que produce movimiento por calor y el propósito epistémico del modelado (es decir, identificar los límites teóricos del rendimiento del motor térmico). Carnot continuó con el modelado utilizando este dispositivo abstracto y el conocimiento teórico del calor (calórico) para interpretar el funcionamiento de una máquina de vapor:

Esta interpretación explica cómo en un calor del motor de vapor se transporta. De esta manera, el dispositivo abstracto que produce movimiento a partir del calor se ha vuelto más sustancial. Carnot concluye que el vapor simplemente sirve como un medio para transportar el calor (calórico), y que "la producción de energía motriz en una máquina de vapor no se debe a un consumo real de calorías, sino a su paso de un cuerpo caliente a uno frío" (ib. 65).

Claramente, el modelado que acabamos de describir no apuntaba principalmente a una representación fiel del trabajo mecánico del motor térmico real. Por otra parte, no se puede deducir mucho del modelo Carnot en este punto. Esta es una de las razones para considerar los modelos científicos como "herramientas epistémicas" en lugar de representaciones. Las herramientas se ofrecen pero también confinan lo que se puede hacer con ellas, sin determinar deductivamente el resultado, ya que este resultado también depende de los aspectos incorporados por el agente cognitivo (ver arriba). Cómo se hace esto, a su vez, depende de propósitos epistémicos y conocimientos de antecedentes específicos de agentes cognitivos. En consecuencia, el modelado tiene como objetivo producir una herramienta epistémica que permite el razonamiento sobre la producción de movimiento por calor en un motor térmico ideal.

Carnot procedió en su esfuerzo de modelización, introduciendo proposiciones y principios que relacionan el transporte de calor (calórico) y la producción de energía motriz con otros parámetros relevantes como la temperatura, el volumen y la compresión o expansión del gas en el modelo de motor de vapor. Su desarrollo de proposiciones y principios se reconstruye y resume en la siguiente lista (ibid. pp. 64-67, selección, parafraseo y numeración de principios por parte de los autores):

a) Un principio experiencial es que el equilibrio restaura dondequiera que exista una diferencia de temperatura, lo que significa que

b) El calor (calórico) siempre fluirá de un cuerpo caliente a un cuerpo frío hasta que los dos cuerpos tengan la misma temperatura, por la cual se restaura el equilibrio.

c) En los motores de vapor, la potencia motriz se produce mediante el restablecimiento del equilibrio calórico, no por el consumo de calorías, y

d) Siempre que haya una diferencia de temperatura, se puede producir energía motriz. Si bien lo contrario también es cierto, es decir,

e) Dondequiera que haya potencia que pueda ser gastada, es posible provocar una diferencia de temperatura y perturbar el equilibrio de calórico.

f) El motor térmico es cualquier motor que es impulsado por calorías.

g) Es un hecho experimental que la temperatura de las sustancias gaseosas aumenta cuando se comprimen, y cae cuando se expanden.

h) Un principio obvio es que el calor sólo puede ser una fuente de movimiento en la medida en que hace que las sustancias sufren cambios en el volumen o la forma.

A continuación, estos principios guían a Carnot en la abstracción de las características de la máquina de vapor real que, en su opinión, no son esenciales para una comprensión teórica de cómo un motor de vapor produce energía motriz por calor (calórico). En consecuencia, se abstrae de componentes concretos como el horno y el condensador, pidiendo al lector que "imagine" dos cuerpos, A y B (la temperatura de A es superior a B), a la que se puede añadir calor (calórico) o del que se puede quitar sin afectar a un cambio en su temperatura, y que actuará como dos depósitos infinitos de calorías. Posteriormente, reinterpreta su concepción del funcionamiento de la máquina de vapor representada en el modelo en términos de parámetros relevantes (por ejemplo, temperatura, presión, volumen, calórico, expansión y compresión del vapor) y en términos de tres Operaciones. Esto resulta en la siguiente reinterpretación de su descripción anterior de la máquina de vapor (ibíd. pp. 67-68):

Si deseamos producir potencia motriz transmitiendo una cierta cantidad de calor del cuerpo A al cuerpo B, podemos hacer esto de la siguiente manera:

(i) Toma algo de calórico del cuerpo A y lo usa para formar vapor. En otras palabras, utilice el cuerpo como si fuera el horno. Se supone que el vapor se produce precisamente a la temperatura del cuerpo A.

(ii) Pasar el vapor en un recipiente de volumen variable, como un cilindro equipado con un pistón, y luego aumentar el volumen. Cuando el vapor se expande de esta manera, su temperatura inevitablemente caerá. Supongamos que la expansión se continúa hasta el punto donde la temperatura se convierte exactamente en la del cuerpo B.

(iii) Condensar el vapor poniéndolo en contacto con B y, al mismo tiempo, sometiéndolo a una presión constante, hasta que esté totalmente licuado. De esta manera, B se comporta como inyector del agua en un motor normal.

A su vez, esta concepción desarrollada de la máquina de vapor permite un modelado posterior. Aquí, Carnot hace uso de una noción (preliminar, no matemática) de procesos 'reversibles' por los que asume que las operaciones (como i, ii, iii) también se pueden llevar a cabo en la dirección opuesta. Sobre la base de esta noción de reversibilidad, afirma que no hay ninguna razón "por la que no debemos formar vapor con calórico del cuerpo B y a la temperatura de B, comprimirlo para llevarlo a la temperatura de A, continuando el proceso de compresión hasta que la licuefacción esté completa " (ibíd. p. 68). Carnot concibe así como el vapor en el cilindro puede volver a su estado inicial con el fin de lograr un ciclo cerrado. La introducción de nuevos principios, es otro aspecto de cómo el razonamiento científico a través de modelos produce conocimiento. En el modelaje de Carnot esto funcionó de la siguiente manera. En su descripción de las operaciones i, ii, y iii Carnot desarrolla una imagen que está cerca de la experiencia (ya que utilizó el conocimiento experiencial de cómo funciona un motor de vapor). Posteriormente, al introducir el principio de que "no hay ninguna razón por la que un proceso no pueda revertirse", conecta el conocimiento de la experiencia con un principio completamente nuevo. Este enfoque da como resultado una descripción de los procesos que aún no forman parte de las experiencias de uno; sin embargo, uno puede creer que podrían ser llevados a cabo por un dispositivo. Esta forma de razonamiento científico produce conocimiento, no porque este proceso se haya observado de alguna manera y la descripción por lo tanto representa algo externo a nosotros, ni porque se dedujo del modelo o de las teorías aceptadas, sino porque Carnot fue capaz de relacionarse el modelo en esa etapa con su concepción de procesos reversibles. En este punto, Carnot ha desarrollado un modelo del motor térmico que pasa por un ciclo (i, ii, iii y reverso), pero todavía necesita averiguar cómo este ciclo producirá la máxima cantidad de potencia motriz. Con respecto a cómo el calor produce energía motriz, Carnot introdujo el principio h. Al introducir algunas proposiciones y principios adicionales, explica las pérdidas (y el evitar las pérdidas) en la producción de energía motriz por calor. El desarrollo de Carnot de estas proposiciones y principios se reconstruye y resume en la lista siguiente, que procede del principio h de la lista anterior (ibíd. pp. 66-73, selección, parafraseo y numeración de principios por los autores).

i) Dado que cualquier proceso en el que se restaure el equilibrio calórico puede hacerse para producir potencia motriz, debe considerarse que un proceso en el que se restablece el equilibrio sin producir trabajo, representa una pérdida real. A partir de la reflexión sobre este último punto, Carnot concluye:

j) Cualquier cambio en la temperatura, que no se deba a un cambio en el volumen de un cuerpo, es necesariamente uno en el que el equilibrio de calórico se restaura en el sistema, por lo tanto:

k) La condición necesaria para la consecución del efecto máximo es que los cuerpos utilizados para producir energía motriz no deben experimentar ningún cambio en la temperatura que no se deba a un cambio de volumen. Sin embargo,

l) Cuando un fluido gaseoso se comprime rápidamente, su temperatura aumenta; y cuando, por otro lado, se expande rápidamente, hay una caída de la temperatura.

Según Carnot, algunos de estos principios son "evidentes" (por ejemplo, h), mientras que otros se derivan de un razonamiento lógico sobre la teoría del calor (por ejemplo, j). El principio k presenta una condición necesaria para producir la máxima cantidad de fuerza motriz. En este punto, el modelo Carnot consiste en la descripción de cómo funciona la máquina de vapor en términos de un ciclo (i, ii, iii y reverso), el propósito epistémico de cómo este ciclo producirá la máxima cantidad de potencia motriz, y principios teóricos y empíricos tales como a - l . Una vez más, el modelado posterior procede de este modelo, es decir, el modelo funciona de nuevo como una herramienta epistémica en su propio desarrollo posterior. De los principios h - l, Carnot deduce que el ciclo evita cualquier "cambio de temperatura que no se deba a un cambio de volumen". Mediante el uso de los principios h - l, significa dónde se encuentra el problema de lograr el efecto máximo: Si un gas se comprime rápidamente, su temperatura aumenta (como se indica en l). Si queremos devolver este gas a su temperatura original sin someterlo a más cambios de volumen, debemos retirar algo de calorías de él (ibíd. p. 74). Por lo tanto, el problema es que el gas se devuelve a su temperatura original mientras lo mantiene en volumen constante, lo que, según el principio j, significa que "el calórico se restaura sin ánimo de lucro". El modelo en su estado actual guía a Carnot en la construcción de una operación que supera este problema. En consecuencia, aduce que sería igualmente posible retirar el mismo calor calórico durante el proceso de compresión de tal manera que la temperatura del gas se mantuviera constante. Por lo tanto, se evita el aumento de la temperatura que se debe a la compresión rápida. Mediante esta solución, Carnot ha construido la "operación" (4) del ciclo 3, 4, 5, 6 (descrito en la sección 3.3)

4. El aire en T_B se pone en contacto con el cuerpo B; luego se comprime mientras se retira calórico, logrando una disminución en V mientras que T permanece constante. Cabe señalar que esta operación no podría derivarse de la mera experiencia con motores de vapor reales. Del mismo modo, si el gas se expande rápidamente (por el cual, según el principio l, la

temperatura caería), la caída de su temperatura se puede evitar si le suministramos una cantidad adecuada de calorías. Carnot ha construido así «operación» (6) del ciclo 3, 4, 5, 6:

6. El aire en T_A se pone en contacto con el cuerpo A; a continuación, el gas se expande mientras se suministra calórico, logrando un aumento en el volumen mientras la temperatura permanece constante. A partir de lo que se da en el modelo en este punto, es decir, haciendo uso del ciclo (i, ii, iii y reverso) y los principios dados, 'operación' 3 y 5 pueden ser construidos también:

3. Se retira el cuerpo A. El gas se expande mientras ya no está en contacto con nadie que pueda actuar como una fuente de calorías. Por lo tanto, hay un aumento simultáneo en el volumen del gas y la caída de la temperatura hasta que es igual a la del cuerpo B. Mientras que 'operación' (5) es el proceso inverso:

5. Se retira el cuerpo B. El gas está comprimido, mientras que ya no está en contacto con nadie que pueda retirar el calor. Hay un de pliegue simultáneo en el volumen del gas y aumento de la temperatura hasta que es igual a la del cuerpo A.

En este punto, el modelo Carnot consiste en la descripción del ciclo 3, 4, 5, 6 y el conocimiento teórico y empírico representado en a-l. Este modelo cumple con el propósito epistémico de saber cómo este ciclo producirá la máxima cantidad de potencia motriz. El modelo se puede utilizar como una herramienta epistémica en la producción de conocimiento sobre el comportamiento del sistema de destino real (el motor de vapor real) porque en el modelado del dispositivo hipotético (por ejemplo, gas encerrado en un cilindro con un pistón móvil, y cuerpo A y B que representaba horno y enfriador) estaba relacionado con la descripción de la máquina de vapor real (por ejemplo, caldera, condensador, agua de refrigeración y horno) y con ocurrencias observables y cantidades medibles (como cambios de volumen y temperatura de un fluido). El modelo no es una representación de motores de calor reales. En cambio, el conocimiento sobre el dispositivo real obtenido de este modelo se limita a su propósito epistémico y por lo tanto permite inferir de sus algunas sugerencias en cuanto a la construcción de motores de vapor reales. Carnot, por ejemplo, sugirió que los principios j y k "deben tenerse en cuenta constantemente en la construcción de motores de vapor. Si el principio no puede observarse estrictamente, cualquier desviación de la misma debe reducirse al mínimo." (ibíd. p. 70). Además, el modelo Carnot en este punto fue utilizado por sus sucesores. Utilizaron este modelo como herramienta epistémica en su desarrollo posterior. Como ya se ha mencionado, han construido nuevos medios representativos como el cálculo diferencial mediante el cual se desarrolló una comprensión más refinada del motor ideal térmico, así como una descripción matemática que permite un mayor desarrollo del modelo Carnot (y que permitió realizar cálculos como la máxima eficiencia teórica). Los sucesores de Carnot también utilizaron su modelo en el desarrollo de ellos en este punto; el modelo Carnot consiste en la descripción del ciclo 3, 4, 5, 6 y el conocimiento teórico y empírico representado en a-l. Este modelo cumple con el propósito epistémico de saber cómo este ciclo producirá la máxima cantidad de potencia motriz. El modelo se puede utilizar como una herramienta epistémica en la producción de conocimiento sobre el comportamiento del sistema de destino real (el motor de vapor real) porque en el modelado del dispositivo hipotético (por ejemplo, gas encerrado en un cilindro con un pistón móvil, y cuerpo A y B que representaba horno y enfriador) estaba relacionado con la descripción de la máquina de vapor real (por ejemplo, caldera, condensador, agua de refrigeración y horno) y con ocurrencias observables y cantidades medibles (como cambios de volumen y temperatura de un fluido). El modelo no es una representación de motores de calor reales. En cambio, el conocimiento sobre el dispositivo real obtenido de este modelo se limita a su propósito epistémico y por lo tanto permite inferir de él algunas sugerencias en cuanto a la construcción de motores de vapor reales. Carnot, por ejemplo, sugirió que los principios j y k "deben tenerse en cuenta constantemente en la construcción de motores de vapor. Si el principio no puede observarse estrictamente, cualquier desviación de la misma debe reducirse al mínimo." (ibíd. p. 70) Además, el modelo Carnot en este punto fue utilizado por sus sucesores. Utilizaron este modelo como herramienta epistémica en su desarrollo posterior. Como ya se ha mencionado, han construido en nuevos medios representativos como el cálculo diferencial por el cual se desarrolló una comprensión más refinada del motor térmico ideal, así como una descripción matemática que permitió un mayor desarrollo del modelo Carnot (y que permitió hacer cálculos como la máxima eficiencia teórica). Los sucesores de Carnot también utilizaron su modelo en el desarrollo de la termodinámica

3.8.- Construcción de modelos y razonamiento basado en modelos

Hemos ilustrado cómo Carnot desarrolló su modelo del motor térmico ideal, y cómo en diferentes etapas el modelo guió su propio desarrollo posterior. En estas etapas, el modelo en ese momento del proceso de modelado se utilizó como una herramienta epistémica para tomar el siguiente paso de modelado. Sorprendentemente, se puede discernir una sucesión de diferentes formas en las que el modelo permitió su propia creación, guiando así también la incorporación de nuevos aspectos que se resumirán a continuación.

El modelado comienza especificando una función epistémica prevista que el modelo de un dispositivo o material tiene que hacer todo el proceso, como encontrar la máxima eficiencia teórica de los motores térmicos. En segundo lugar, a la luz de esta función epistémica, se identifica y conceptualiza un fenómeno en términos de los cuales se puede entender el buen funcionamiento del dispositivo o material (por ejemplo, el fenómeno de producir trabajo por calor en motores térmicos). En tercer lugar, se conceptualiza un dispositivo idealizado o material idealizado que produce el fenómeno de interés. Esta concepción se abstrae de varias características del dispositivo real o del material real (por ejemplo, del trabajo mecánico del motor térmico real) en vista del propósito epistémico. En cuarto lugar, el funcionamiento del dispositivo o material idealizado se conceptualiza en términos de «operaciones» o procesos físicos, lo que implica que el conocimiento de las «operaciones», los procesos físicos, los fenómenos o las propiedades pertinentes se integran en el modelo (por ejemplo, conocimiento de los procesos físicos relevantes para describir los flujos de calor y se incorporó el esfuerzo que resulta de exponer el dispositivo idealizado a ciertas condiciones externas). Quinto, principios (por ejemplo, cómo se logra el efecto máximo) y conocimientos teóricos (por ejemplo, las leyes de gas de Boyle, Mariotte y Gay-Lussac) sobre estas "operaciones" y los procesos físicos en términos de variables físicas relevantes para el dispositivo o material (por ejemplo, P, V, T, y el calor específico) se incorporan en el modelo. Además, se incorporaron principios experienciales (por ejemplo, tendencia al equilibrio de la temperatura) en el modelo. En consecuencia, mirar el modelo

Carnot desde la perspectiva de su construcción hace plausible que la actividad misma del desarrollo del modelo (es decir, modelado) guiara a Carnot en la búsqueda del ciclo termodinámico que produce la máxima eficiencia teórica de un motor de calor ideal.

Sugerimos que estas diferentes formas de incorporar aspectos sucesivos en el modelo no son particulares para el caso Carnot, sino que presentan una cuenta más general de los procesos de modelado en las ciencias de la ingeniería. Sin embargo, no afirmamos que hayamos abarcado todos los aspectos pertinentes, ni que todos los aspectos mencionados se puedan encontrar en todos los modelos. Nuestro análisis de este caso está en contradicción con aquellos puntos de vista ampliamente mantenidos sobre los modelos (que se derivan de la visión sintáctica de las teorías), que suponen que los modelos se derivan de teorías o principios generales. De hecho, en los libros de texto modernos, el motor Carnot se presenta generalmente como si fuera algo, cómo derivado de la teoría termodinámica. Sin embargo, históricamente fue el modelo Carnot del motor térmico el que contribuyó a la teoría de la termodinámica y sólo en retrospectiva podría ser visto como satisfactorio de los axiomas de la termodinámica (cf. [Erlichson, 1999]). Con respecto a la visión semántica de los modelos, argumentamos que descuida algunas cuestiones cruciales relativas al modelado, en particular la forma en que los científicos llegan a los sistemas modelo (como el motor térmico ideal). En este punto de vista, el sistema modelo se da por sentado, mientras que hemos ilustrado que mucho trabajo teórico necesita dormir uno para llegar a un sistema modelo (cf. Hodges, esta compilación).

En resumen, el modelo Carnot de un motor térmico es como muchos, otros modelos científicos en el sentido de que representa una entidad ideal que puede ser interpretada en términos de un fenómeno (el de producir movimiento por calor), lo que hace que el modelo sea propenso a un examen científico más intenso. En lugar de describir un objeto real (el motor de calor real) el modelo Carnot presenta en realidad un objeto ideal, similar al modelo de un péndulo ideal, el modelo de depredador-presa Lotka-Volterra, o modelos económicos ideal de las economías. Al hacerlo, el proceso de desarrollo del modelo (es decir, modelado) ha dado lugar a novedades conceptuales: la noción de "la eficiencia de convertir el calor en trabajo" no existía antes del modelo teórico de Carnot, ni la idea según la cual cualquier cambio en la temperatura que no es debido a un cambio en el volumen de un cuerpo es necesariamente uno en el que el equilibrio de calorías se restaura sin ganancias. El modelo del motor térmico ideal incorporó varios tipos de conocimientos experienciales y teóricos (por ejemplo, las leyes del gas) y como si distan pensar en el comportamiento de los motores térmicos de una manera novedosa también condujo por su parte al consiguiente desarrollo de la teoría termodinámica.

4 .- HACIA UNA NOCIÓN AMPLIADA DE MODELOS

Hemos argumentado en contra de la idea generalmente aceptada entre los filósofos, de que los modelos pueden ser considerados como representaciones reales (varias mentes definidas) de algunos sistemas de destino. Como alternativa, hemos propuesto un relato pragmático de modelos como herramientas epistémicas. Por supuesto, no somos los primeros en argumentar en contra de la visión de representación de los modelos. Sin embargo, incluso en esos relatos, la noción de representación tiende a volver a entrar en escena, cuando se trata de responder a la pregunta de por qué los modelos se pueden utilizar para conocer los sistemas de destino reales. Así, por ejemplo, después de haber defendido la importancia de construir y manipular modelos, Morrison y Morgan [1999] afirman que podemos aprender de los modelos porque representan sus sistemas objetivos. Hemos argumentado, en cambio, que concebir modelos como de posición en una relación de representación directa con algunos sistemas objetivos reales, no arroja luz sobre su funcionamiento epistémico. Filosóficamente, nuestra noción propuesta de modelos como herramientas epistémicas se centra en el valor cognitivo del modelado y sus diferentes roles en la empresa científica destacando la importancia de diferentes medios representativos para el razonamiento basado en modelos. Desde el punto de vista de la práctica, uno de los problemas del enfoque representativo es, más bien paradójicamente, que al concentrarse en la relación entre el modelo y su sistema objetivo real, se abstrae de los medios de representación reales con los que los científicos van a construir sus modelos.

El relato representativo de los modelos también conduce a problemas relacionados con la ontología de los modelos, que recientemente ha atraído bastante interés en la filosofía de la ciencia. La pregunta ha sido si los modelos científicos deben concebirse en términos de las descripciones de los modelos (es decir, imágenes, diagramas o ecuaciones matemáticas) o si son entidades abstractas o imaginarias. Desde el punto de vista representativo parece crucial señalar la misma entidad que se supone que corresponde a los sistemas del mundo real. Sin embargo, tanto las alternativas propuestas, es decir, modelos como descripciones de modelos y modelos como entidades abstractas o imaginarias, conducen a problemas. Los modelos no se pueden identificar con descripciones de modelos porque las meras descripciones en sí mismas no significan nada. Por otro lado, parece difícil explicar cómo una entidad abstracta o imaginaria, aparte de su descripción, logra permitir cualquier razonamiento. A diferencia de esta perspectiva, nuestro enfoque de los modelos como herramientas epistémicas invoca la actividad de modelado que implica, por lo tanto, una noción extendida de modelos como entidades en desarrollo, que son construidos con medios representativos concretos que transmiten un contenido hipotético. Desde esta perspectiva, un modelo no se reduce ni a una entidad abstracta ni a los medios de representación con los que se construye. Los diversos aspectos que hacen una parte irreductible del modelado incluyen, por ejemplo, (1) los propósitos epistémicos que el modelo tiene que cumplir, (2) el fenómeno que determina la función del dispositivo o material de interés, (3) las abstracciones e idealizaciones necesarios para construir los objetos hipotéticos, (4) los diferentes tipos de medios representativos utilizados, tales como diagramas, imágenes o símbolos, (5) conocimientos o principios físicos, teóricos y experienciales que se construyen en el modelo, y (6) variables físicas relevantes y parámetros que son conocidos, medidos o determinados de otro sentido, y que llegan tarde al modelo con lo que es observable o medible por medio de instrumentos. Nos parece que sin tener en cuenta estos aspectos del modelado sería comprensible cómo los científicos fueron capaces de desarrollar modelos y razonar con la ayuda de ellos. A menudo estos aspectos van sin ningún aviso explícito en la práctica científica, pero esto no autoriza a los filósofos a descuidarlos en sus relatos de modelos.

Por último, pero no menos importante, acercarnos a los modelos como herramientas epistémicas nos lleva a considerar los diversos usos epistémicos de modelos, como el razonamiento científico, la predicción, la construcción teórica, la formación de conceptos y el diseño de otros artefactos, instrumentos o experimentos. No hay razón para esperar que los y dibujen en la misma dirección y por lo tanto los científicos utilizan a menudo modelos diferentes y conflictivos, incluso al considerar el mismo fenómeno, dependiendo de la tarea en cuestión. Sin embargo, averiguar más acerca de cómo las diversas tareas de los modelos tal vez se refuerzan o alternativamente se contradicen entre sí parece una dirección interesante para la investigación posterior.

CAPITULO V

MODELOS BASADOS EN EL RAZONAMIENTO EN INGENIERIA INTERDISCIPLINARIA

Por Nancy J. Nersessian y Christopher Patton

1 INTRODUCCION

La investigación en ingeniería biomédica a menudo enfrenta el problema de que no es práctico y poco ético llevar a cabo experimentos directamente en animales o seres humanos. En nuestros estudios de dos laboratorios pioneros de investigación en ingeniería biomédica, hemos encontrado una práctica de investigación común en este campo interdisciplinario es diseñar, construir y rediseñar sistemas in vitro, que seleccionaron paralelamente las características de los sistemas in vivo. Los investigadores se refieren a sus modelos in vitro como "dispositivos". Cuando los componentes biológicos y de ingeniería se reúnen en una investigación, los investigadores se refieren a esto como un "sistema de modelos". Como dijo un encuestado: "Cuando todo se junta, lo llamaría un 'sistema de modelos' [...] Creo que sería muy seguro utilizar esa [noción] como la naturaleza integrada, el aspecto biológico que se une con un aspecto de ingeniería, por lo que es un sistema de modelado multifacético, creo que es muy buena terminología para describir eso". Otro investigador se refirió acertadamente a los procesos de construcción y manipulación de estos sistemas-modelo como "poner un pensamiento en la parte superior del banco y ver si funciona o no". La "parte superior del banco" no se refiere a la superficie plana de la mesa, sino que comprende todos los lugares donde se lleva a cabo la experimentación. Estos "pensamientos" (modelos mentales) son modelos físicos (dispositivos) que representan lo que los investigadores consideran propiedades y comportamientos destacados de los sistemas biológicos. Son análogos estructurales, conductuales o funcionales de fenómenos in vivo de interés. Los dispositivos también son sistemas en sí, con restricciones de ingeniería que a menudo imponen simplificaciones e idealizaciones no relacionadas con los sistemas biológicos que modelan. En el siguiente análisis examinaremos algunos de estos sistemas multifacéticos en las prácticas de resolución de problemas de los laboratorios, especialmente cuando se encuentran en situaciones experimentales. En cada caso examinaremos cómo la manipulación de dispositivos y sistemas-modelos permite una forma de inferencia —"razonamiento basado en modelos"— diferente de la inferencia lógica a través de la manipulación de representaciones propositivas.

Nuestro análisis deriva de una investigación de cinco años de las prácticas de investigación de dos laboratorios; uno lleva a cabo la ingeniería de tejidos, el otro, la ingeniería neuronal. Estos son entornos híbridos de ingeniería y ciencia. La naturaleza híbrida de estos laboratorios se refleja en los sistemas de modelos de bioingeniería desarrollados por los laboratorios y en las características de los investigadores-estudiantes que forman parte de un programa dirigido explícitamente a producir pensadores en bioingeniería. Los laboratorios y los entornos de aprendizaje están diseñados para ir más allá del modelo tradicional de colaboración entre ingenieros, biólogos y médicos a un nuevo tipo de ingeniería biomédica integrativa que acortará el alcance entre la investigación de laboratorio y la aplicación médica. Este es el objetivo; en realidad, la investigación todavía no está suficientemente avanzada para las aplicaciones médicas deseadas, y la biología integrativa y la ingeniería domina la práctica.

"Lab A" busca diseñar recolocaciones de tejido vascular listos para el sistema cardiovascular humano. Algunos problemas intermedios que impulsan la investigación son: la producción de "construcciones" (modelos compuestos de tejido vivo que imitan las propiedades de los vasos naturales); examinar y mejorar sus propiedades mecánicas; y la creación de fuentes celulares endoteliales a través de la manipulación mecánica de células madre. Aunque el objetivo final del laboratorio es hacer un artefacto, los investigadores crean tanto nuevos conocimientos (por ejemplo, de las propiedades de las células bajo diversas condiciones) como nuevos conocimientos (por ejemplo, técnicas de tejidos de ingeniería) como parte de la situación problemática. "Lab D" busca entender las formas en que las neuronas aprenden en el cerebro, para crear ayudas para discapacidades urológicas o, más superlativo, "para hacer a los humanos más inteligentes" (Director de Lab D). Sus investigaciones intermedias se centran en encontrar evidencia de plasticidad en un "plato" de matrices de neuronas multi electrodos, y producir actividad "muscular" controlada en robots o en agentes simulados (animados), que constituyen sus sistemas modelo. Puesto que la mayoría de las investigaciones anteriores, se han centrado en las neuronas individuales, y tan poco se sabe acerca de cómo los cerebros aprenden, el objetivo principal de esta investigación es también crear nuevos conocimientos. Significativo para nuestro análisis, la naturaleza fronteriza de ambos laboratorios, exige que también diseñen y construyan nuevas tecnologías de investigación.

Los métodos de nuestro análisis son en algunos aspectos inusuales para la filosofía de la ciencia y la tecnología, aunque de acuerdo con una epistemología naturalista. El análisis deriva de los datos que recopilamos en un estudio etnográfico y cognitivo-histórico de cinco años de los dos laboratorios. Uno de los objetivos del estudio fue extender el trabajo anterior de Nersessian sobre razonamiento basado en modelos (véase, por ejemplo, Nersessian [2008]) con modelos conceptuales a modelos físicos y computacionales. Otra fue intentar un relato integrador de factores cognitivos, sociales, culturales y materiales en su desarrollo y uso [Nersessian, 2005]. Al igual que con otras etnografías, esa parte del estudio utiliza observaciones y entrevistas para descubrir las actividades, herramientas, y marcos de interpretación que apoyan la investigación como ellos se encuentran en las prácticas en curso de la comunidad. La parte cognitivo-histórica del estudio recopila y analiza datos de fuentes históricas tradicionales (publicaciones, propuestas de subvenciones, cuadernos de laboratorio y artefactos tecnológicos). (Aunque parte del material del que citamos, proviene de fuentes publicadas, dadas las regulaciones que rigen la confidencialidad de la investigación de sujetos humanos, si los autores están entre los sujetos no podemos proporcionar citas a ese material aquí. Parece que no se anticipó la posibilidad de realizar investigaciones históricas en conjunto con investigaciones sobre seres humanos!) El objetivo es captar la dimensión diacrónica de la investigación trazando las trayectorias intersectantes de los componentes humanos y tecnológicos del laboratorio, concebidos como un sistema cognitivo-cultural en evolución, tanto a partir de registros históricos como datos etnográficos. Esta novedosa combinación de métodos permite desarrollar descripciones gruesas e ideas analíticas que capturan la dinámica de investigación característica de los laboratorios de investigación.

Al abordar el problema de la integración, el truco es crear cuentas que no sean cognitivas con la cultura pegada ni al revés y esto requiere repensar las categorías interpretativas actuales. En nuestra investigación intentamos un cambio en el enfoque analítico de considerar los factores cognitivos y socioculturales como variables independientes a considerar los procesos cognitivos y socioculturales como integrales entre sí. Una forma de hacer el cambio hacia la integración sería interpretar que los procesos cognitivos comprenden más de lo que ocurre en la cabeza de un científico individual, y analizar el pensamiento científico como que ocurre dentro de sistemas cognitivo-culturales complejos compuesto de seres humanos y artefactos. Una afirmación central de nuestro análisis, entonces, es que la inferencia se realiza a través de modelos mentales y físicos entrelazados y que los dispositivos sirven como centros para enclavamiento de facetas cognitivas y culturales del laboratorio de investigación.

Nuestra estrategia en este artículo es describir las prácticas de modelado en cada laboratorio, y centrarse en un ejemplo de investigación experimental utilizando un sistema de modelos de cada laboratorio. A continuación, desmontamos en general la naturaleza del razonamiento que implica la construcción, manipulación y revisión de los sistemas de modelos. Un problema a menudo observado con estos métodos de "estudio de caso" es cómo se generaliza de un caso específico o de cualquier número de casos. La noción subyacente a este problema es la "generalización inductiva" de los casos. Nos suscribimos, más bien, a la noción etnográfica de "transferencia" entre sitios/casos. En la etnografía se desarrollan descripciones ricamente detalladas de un sitio. Al llevar a cabo investigaciones comparativas de múltiples sitios, se crean descripciones gruesas de cada uno, y se examinan para ver lo que posiblemente pueda transferirse a través de sitios, así como lo que la importancia no lo hace. Aunque los detalles en cada caso difieren, nuestras ideas sobre el razonamiento basado en modelos sí se transfieren a través de los laboratorios.

Las principales conclusiones de nuestro análisis se derivan de la observación de que diseñar, rediseñar y experimentar con modelos de simulación in vitro (dispositivos) es una práctica de investigación de firma. La simulación física es una actividad epistémica que implica exploración, pruebas y generación de hipótesis, así como predicción y explicación. Los dispositivos sirven como centros para enclavar conceptos biológicos y de ingeniería, métodos y materiales, representaciones mentales y externas en inferencia basada en modelos, diseño e historia, e investigación y aprendizaje. Para la brevedad nos referimos a esta noción multidimensional como modelos de enclavamiento.

2.- LABORATORIO DE INGENIERÍA DE TEJIDOS: EL "SISTEMA DE MODELOS DE CONSTRUCCIÓN VASCULAR"

El laboratorio A tiene como objetivo final el desarrollo de vasos sanguíneos artificiales (denominados localmente "construcciones"). Estos están diseñados a partir de tejido vivo y tendrán que tener las características adecuadas para funcionar dentro del cuerpo humano, tal como suficiente fuerza para soportar las fuerzas del flujo sanguíneo y las células endoteliales que lo recubren que son capaces de proliferar. Una división in vivo/in vitro/ex vivo es un componente significativo de la práctica de orientación del marco cognitivo en el laboratorio A. El entorno del banco de pruebas para el desarrollo de vasos sanguíneos artificiales no puede ser el cuerpo humano, por lo que los investigadores tienen que diseñar facsímiles in vitro del entorno in vivo y entornos de implantación ex vivo (los llamados "modelos animales") donde pueden ocurrir experimentos. En este contexto, «ex vivo» se refiere a un animal que ha sido alterado de tal manera que la experimentación puede tener lugar externa a su cuerpo. El principal desafío es reunir materiales biológicos y de ingeniería con las propiedades deseadas para funcionar correctamente in vivo. Como se caracteriza por el Director del Laboratorio, las "principales barreras" se dividen en dos categorías: las propiedades mecánicas del tejido y la influencia de las fuerzas mecánicas en el tejido y las estrategias de fuente celular que apoyan la endotelialización.

Muchos aspectos de los fenómenos in vivo son conocidos y comprendidos tanto en términos biológicos como mecánicos, pero muchas no lo son, como la forma en que las células proliferan. Por lo tanto, el laboratorio hace contribuciones (nuevos conocimientos y know-how) a la biología básica y a las aplicaciones de ingeniería. La investigación diaria en el laboratorio A está dirigida a resolver problemas que son piezas más pequeñas del gran objetivo, como la proliferación de células endoteliales dentro de las construcciones, que implica, por ejemplo, estudios de perfiles genéticos, y la creación de construcciones que pueden soportar las poderosas fuerzas mecánicas del flujo sanguíneo in vivo, lo que implica el avance de la tecnología de gel de colágeno. En las siguientes secciones desagregamos algunos de los dispositivos centrales que forman los principales componentes de los sistemas de modelos en estos laboratorios y cómo se entrelazan en la práctica experimental.

2.1 El dispositivo de canal de flujo

El laboratorio A ha existido desde 1986 y fue creado específicamente para mover la investigación, como expresó el Director del Laboratorio, "de los estudios con animales al cultivo celular". La experimentación temprana de la bioingeniería en el sistema vascular fue llevada a cabo por el Director del Laboratorio y colegas sobre los vasos sanguíneos que fueron alterados mientras estaban en el animal vivo. A través de intervenciones quirúrgicas se hicieron vasos sanguíneos para exhibir condiciones patológicas que consisten en el estrechamiento de las arterias nativas (estenosis). Después de sacrificar estos animales, se estudió la morfología de las células que recubren las paredes arteriales en las regiones patológicamente alteradas y se cuantificaron aspectos específicos (por ejemplo, elongación y orientación de filamentos celulares). Simultáneamente, se estudiaron patrones de flujo arterial (perfiles de velocidad) para el estrechamiento patológico de las arterias mediante la creación de modelos que replicaron las dimensiones geométricas de estas regiones patológicas observadas. Estos modelos estructurales se lograron llenando los vasos arteriales de los animales sacrificados con un plástico fluido. Después del endurecimiento se utilizaron como moldes para fabricar réplicas del recipiente estrecho. Estos modelos de réplica se utilizaron en "estudios de flujo" experimentales, donde se utilizaron técnicas láser Doppler para determinar patrones de velocidad. Los resultados obtenidos por el estudio de la morfología celular y el estudio de patrones de velocidad en los modelos de réplica se correlacionaron para obtener información sobre las relaciones entre las variaciones en el estrés de cizallamiento de pared, debido a patrones de velocidad particulares (gradientes cerca del recipiente (pared) y la morfología de las células que recubren estos vasos. El material elaborado y las prácticas de medición relacionadas con los modelos de réplica fueron rápidamente abandonadas, pero lanzaron el programa del director de estudiar el impacto del flujo en las tensiones de cizallamiento de paredes arteriales in vitro con dispositivos de ingeniería, la agenda de investigación de Laboratorio A.

Junto con los estudios de réplica y los estudios de morfología celular asociados, el director y otros investigadores comenzaron una línea de investigación con cultivos celulares de las células endoteliales, que recubren típicamente las paredes arteriales. Este trabajo proporcionó la base para la configuración inicial del laboratorio A. En lugar de inducir estenosis en animales vivos, y así crear patrones de flujo particulares que resulten en tensiones de cizallamiento de pared particulares, en su lugar expusieron el tipo de celda respectivo en el cultivo a las tensiones de cizallamiento de pared "fluyéndolas" en un dispositivo de canal de flujo (llamado el "bucle de flujo" en el laboratorio). Estos experimentos in vitro sobre la respuesta de las células a las tensiones de cizallamiento se basaron en un modelo dinámico de fluido establecido, específicamente, y la mecánica de fluidos de un canal largo con sección transversal rectangular. Con este dispositivo, los cambios en la morfología celular (elongación y orientación) podrían estar relacionados directamente con las tensiones de cizallamiento de pared controladas. Además, el método de medición de patrones de velocidad en un modelo de réplica fue reemplazado por un modelo de ingeniería de especificación geométrica exacta, un canal de flujo. Con el canal de flujo controlado la correspondencia entre el modelo matemático y el modelo físico se convirtió en un problema de ingeniería de un canal con las dimensiones apropiadas (en un rango fisiológicamente significativo), en lugar de medir patrones de velocidad usando tecnología elaborada de láser Doppler. Los estudios que utilizaron el modelo de réplica, de hecho, habían disociado el estudio de la morfología celular del estudio de los patrones de flujo, correlacionando sus resultados después del hecho. El bucle de flujo en acción es un sistema de modelos en el que los dos focos de estudio se concentran en un único sistema donde las células cultivadas estaban expuestas al flujo y, por lo tanto, cortan de una naturaleza bien definida.

El paso a in vitro resolvió problemas relacionados con el hecho de que se necesitan veinticuatro horas para ver los resultados de las intervenciones realizadas en animales y durante ese período se llevan a cabo cambios fisiológicos. Sin embargo, como modelo, no representa la naturaleza diacrónica del entorno in vivo, aunque sea dinámico. El flujo sanguíneo in vivo cambia, por ejemplo, al comer y dormir. Por lo tanto, la eliminación de los factores de encuentro, conduce a una simulación del entorno in vivo que es "algo muy abstracto porque hay muchos ambientes in vivo y hay muchas condiciones in vivo dentro de ese entorno. Las cosas cambian constantemente en nuestros cuerpos a lo largo de nuestra vida; incluyendo caudales fisiológicos [....] Así que no creo que estemos tratando de imitar las condiciones exactas que se encuentran in vivo”.

En la línea de investigación de cultivo celular, un artefacto de ingeniería, un canal de flujo con los componentes que inducen el flujo que lo acompañan sirve como un modelo in vitro paralelo a ciertas condiciones in vivo del vaso sanguíneo, incluyendo tanto las condiciones normales como la patología que anteriormente se indujo en organismos vivos. El bucle de flujo representa una aproximación de primer orden de las tensiones de cizallamiento durante el flujo sanguíneo en la arteria, "como ingenieros, tratamos de emular ese entorno, pero también intentamos eliminar tantas variables extrañas como sea posible. Así que podemos centrarnos en el efecto de uno o tal vez dos, para que nuestras conclusiones puedan extraerse del cambio de una sola variable". El bucle de flujo proporciona "una manera de imponer una tensión cortante muy bien definida a través de una población muy grande de células de tal manera que su respuesta agregada se deba a [ella] y podemos basar nuestras conclusiones en la respuesta general de toda la población". La velocidad a la que funciona la bomba de bucle de flujo refleja el conocimiento de lo rápido que fluye la sangre in vivo, y el amortiguador de pulsos convierte el líquido que fluye del flujo pulsante a un flujo suave que permite el control sobre la constancia del flujo. El bucle de flujo permite manipular la cantidad de tensión de cizallamiento (velocidad de flujo), duración y altura de la cámara. El uso en simulaciones de flujo también permite la manipulación de células o construcciones vasculares de ingeniería. A medida que el laboratorio comenzó a establecerse, todos los miembros llevaron a cabo estudios de bucle de flujo sobre células cultivadas. Con el tiempo, se han diseñado nuevos dispositivos de simulación no sólo para entender las fuerzas mecánicas que crean patología, sino para crear las construcciones vasculares que algún día repararán las arterias enfermas, como se discutirá a continuación. Desde el principio, el rediseño ha sido una actividad central dentro del laboratorio A.

El bucle de flujo proporciona una instancia principal de esta actividad. Al trabajar con células cultivadas, la contaminación es un problema constante y este problema fue el factor impulsor en el rediseño del dispositivo de canal de flujo. Una entrevista con un antiguo estudiante de posgrado, ahora un miembro exitoso de la facultad en otra institución, explica este problema y el posterior rediseño:

"Así que, cuando llegué aquí en 1994, la cámara de flujo era un desastre. Era un sistema de sobremesa; tenía tubos voluminosos que parecían algo así como una máquina del tiempo de la década de 1950 o algo [...]. Pero de todos modos era bastante desordenado y sabes que los estudios de cultivo tienen que hacerse a 37 grados así que la forma en que harían esto era ya sabes, las incubadoras estaban ciertamente alrededor en 1994, envolverían estas bobinas, estas bobinas de calentamiento alrededor de estos depósitos de vidrio y porque tenía que ser un flujo establecido, utilizarían una diferencia de presión hidrostática para derivar el flujo, y una abrazadera, una abrazadera regulada para tratar de regular el flujo a través de la cámara y hacia el depósito inferior. Así que tenías dos embalses, uno en la parte superior, y otro en la parte inferior, habría una diferencia hidrostática entre ellos, y luego las cosas fluirían y entonces todo esto estaría sentado en la parte superior del banco — grandes depósitos de vidrio voluminosos con tubos voluminosos [...]. Y esto estaba sujeto a una tasa de éxito del 50%".

Entrevistador: ¿En términos de contaminación?

"En términos de contaminación. Y la razón era porque todo esto tenía que ser ensamblado fuera del capó [coloquial para 'el banco de trabajo estéril']. No había manera de que pudieras montar esta cosa para ponerte de pie, esta cosa estaba en las gradas, tienes que ensamblar esta parte fuera del capó, así que básicamente con ellos conectaríamos estas articulaciones aquí, y las conectaríamos fuera del capó. [...] Hacer experimentos de más de 48 horas fue casi imposible, porque en experimentos de más de 48 horas la incidencia de contaminación fue probablemente superior al 90%. [.....] Me gustan mucho los diseños compactos [...]. Instituí muchas de las cosas que vi allí [refiriéndome al laboratorio en el que se internaba] en nuestro laboratorio, y una de las cosas era la revisión de modelos de este diseño para entrar en la incubadora. Y, por eso realmente pasamos de un sistema que requería bobinas de calentamiento y un depósito superior y un depósito inferior a un sistema que era impulsado por el flujo con una bomba peristáltica y un amortiguador de pulsos que era — y todo se podía hacer dentro de la incubadora con tubos más pequeños, pequeños embalses en lugar de grandes embalses".

"Revisar el modelo de este diseño", como describió el ex estudiante de posgrado a esta línea de investigación, significaba rediseñar el sistema físico que es el dispositivo del canal de flujo, sus partes (por ejemplo, los embalses, el tubo), la instalación (por ejemplo, en los soportes de laboratorio en el laboratorio contra compacto y en la incubadora), y los principios físicos que rigen su diseño funcional (por ejemplo, la diferencia de presión hidrostática frente a la integración de una bomba peristáltica). El canal de flujo real, que es la parte donde el líquido fluye sobre los cultivos celulares, quedó intacto en este rediseño particular. Aunque el rediseño, en este caso, no involucró aquellas partes donde las células en cultivo interconectaban con el dispositivo mecánico, la reingeniería de este diseño fue fundamental para su función como parte de un sistema de modelos, que depende totalmente de su resistencia a su resistencia a contaminación de los cultivos celulares. La configuración que funciona como sistema-modelo es lo suficientemente descomponible para permitir el rediseño independiente de sus diversos componentes.

Desde entonces, el bucle de flujo ha sido objeto de un rediseño menor, como el relacionado con un estudiante de doctorado actual, debido a la introducción de un nuevo dispositivo, la construcción (descrita en detalle a continuación). Al desahogar su propio rediseño, comenzó con la narración de cómo la investigadora, justo antes que ella, había modificado el bloque de flujo para resolver algunos problemas técnicos. El dispositivo modificado que heredó se había utilizado previamente en las celdas. Ahora quería usar el bucle de flujo para experimentar con las construcciones vasculares sembradas con células endoteliales, cortadas abiertas y colocadas planas para fluir. Estas construcciones planas son más gruesas que las células musculares utilizadas antes, y accidentadas. Debido a estas características, los espaciadores deben utilizarse entre el bloque y las diapositivas de vidrio con el fin de mejorar el patrón de flujo alrededor del límite para traer el modelo in vitro más acorde con el flujo en el modelo in vivo. Para comenzar esta investigación, ella, junto con otro nuevo estudiante, tuvo que rediseñar el dispositivo cambiando el ancho de la hendidura de flujo para sostener los espaciadores. Más recientemente, otro estudiante planeó un rediseño significativo para permitir el flujo de construcciones en forma tubular con el fin de acomodar la implantación en un "modelo animal" que será desagregado en la siguiente sección. Este rediseño sería un paso significativo en el movimiento hacia la implantación in vivo en el que las construcciones no tendrían que abrirse para poder fluir.

2.2 La "construcción"

Las células endoteliales que forman el endotelio, una monocapa de células que componen el revestimiento interno del vaso sanguíneo son un objetivo principal de estudio en el laboratorio. In vivo estos están más cerca del flujo sanguíneo. El cultivo de células necesita emular las condiciones naturales del tejido vivo en un organismo en la medida en que las células son necesarias para sobrevivir y funcionar de manera particular. Esta emulación requiere cosas tales como los niveles de CO_2 apropiados en las incubadoras y que las incubadoras mantengan las células en el rango de temperatura requerido. Además, los tipos de células identificadas para la inserción en los sustitutos vasculares deben estar fácilmente disponibles y compatibles con los tejidos adyacentes. Esto requiere un método para asegurar el crecimiento celular y la proliferación y las fuentes celulares para la producción. Así que la introducción de la construcción ha llevado también a una línea de investigación de células madre. Hasta finales de la década de 1990, los experimentos de bucle de flujo se realizaban sólo en cultivos celulares, en diapositivas generalmente recubiertas con una sustancia para hacer que se adhieran. Después de fluir se retiran y examinan a través de diversos instrumentos como el contador de hematocritos y el microscopio confocal para determinar los efectos de las propiedades mecánicas del flujo en la forma (morfología), alineación, proliferación (reproducción), o Migración (locomoción). Sin embargo, como observó un investigador, "el cultivo celular no es un modelo fisiológico; es un modelo en el que las respuestas biológicas pueden observarse en condiciones de laboratorio, cuidadosamente diseñadas y bien definidas." Por lo tanto, aunque todavía se realizan muchos experimentos en cultivos celulares, el problema de construir un sustituto vascular de ingeniería de tejido ha llevado a la creación de un nuevo dispositivo de simulación, la construcción. Como relató el director del laboratorio, la investigación actual tiene como objetivo:

> "utilizar este concepto de ingeniería de tejidos para desarrollar mejores modelos para estudiar las células en el cultivo. Poner las células en plástico y exponerlas al flujo no es una muy buena simulación de lo que realmente está sucediendo en el cuerpo. Las células endoteliales, que han sido mi foco durante treinta años, tienen un vecino natural llamado células musculares lisas. Si miras dentro de la pared del vaso, tienes las células musculares lisas y luego el revestimiento interior son las células endoteliales, pero estos tipos de células se comunican entre sí. Así que tuvimos una idea: vamos a tratar de diseñar un mejor modelo-sistema para el uso de cultivos celulares".

La construcción marca un movimiento hacia un modelo más fisiológico, uno cuya función es más como el modelo in vivo a lo largo de las dimensiones mecánicas, físicas y bioquímicas. Un vaso sanguíneo real está en forma tubular y comprende varias capas: el lumen donde fluye la sangre; una primera monocapa de células endoteliales que se asisten sobre colágeno, una lámina elástica interna, una segunda capa de células musculares lisas, colágeno y elastina, lámina elástica externa y una tercera capa de fibroblastos conectados libremente. In vivo, las células crean una matriz celular adicional que es una red de proteínas y otras moléculas, y proporciona factores de crecimiento y propiedades mecánicas. En el proceso de cultivo in vitro, la construcción se siembra sobre un manguito de silicio en forma tubular. A diferencia de los cultivos de celda en las diapositivas, las construcciones son superficies tridimensionales en las que se incrustan las celdas. La construcción es un dispositivo "húmedo", un "modelo de pared de vasos sanguíneos" vivo que simula procesos in vivo. Es un componente significativo de los proyectos de investigación actuales del hombre. La esperanza es que "nuestra construcción se comporte como una arteria nativa porque eso es un paso más cerca de ser funcional. Así que estamos haciendo una cosa que imita. Entonces, ¿responde de la misma manera?" Cuando finalmente se utiliza como sistemas de reemplazo para el cuerpo humano, los sustitutos biológicos deben replicar las funciones de los tejidos que se reemplazan. Esto significa que los materiales utilizados para cultivar estos sustitutos deben fusionarse de una manera que imita las propiedades de los tejidos nativos. También significa que las células que están incrustadas en el material de andamiaje deben replicar las capacidades y comportamientos de las células nativas, para que se puedan lograr funciones de tejido de nivel superior. "Responder de la misma manera" significa, entre otras cosas, que expresa las proteínas y marcadores genéticos adecuados.

En la realización de una construcción, se utilizan diferentes niveles de aproximación dependiendo de la naturaleza del experimento. Es posible, por ejemplo, utilizar sólo colágeno y no añadir elastina. Muy a menudo las células no son aórticas humanas endoteliales y células musculares lisas. Algunos experimentos se llevan a cabo con sólo una capa del vaso sanguíneo, todo con células endoteliales o células musculares lisas. Así, la construcción forma una familia de modelos, diseñados para diferentes propósitos experimentales. En el experimento que describimos a continuación, realizado con células de babuino con un modelo animal de babuino, la tercera capa no fue diseñada porque la investigadora consideró innecesario para su experimento y también supuso que crecería a sí misma. Además, usó un andamio de teflón en el exterior de la construcción, ya que no es lo suficientemente fuerte como para soportar las fuerzas del flujo sanguíneo del babuino. Lo más significativo es que, en experimentos con el bucle de flujo actual, las construcciones deben cortarse abiertas para establecerse planas dentro de la cámara de flujo tal como se diseñaron. El hecho de que la construcción fluida es plana debido al diseño del lazo de flujo mientras que el vaso sanguíneo es curvo es una aproximación a la superficie tubular. Sin embargo, dado que las células son tan pequeñas con respecto a ella, el carácter plano no es una aproximación para estos principales objetos de estudio. De hecho, desde la "perspectiva de la célula" no es una aproximación, ya que "la célula ve básicamente una superficie plana. Sabes, la curvatura es tal vez una de más de un centímetro, mientras que la célula es como un micrómetro, como 10 micrómetros de diámetro. Es como diez milésimas del tamaño, así que para la célula no tiene idea de que en realidad hay una curva en ella. "Es decir, el líquido que fluye sobre estas construcciones planas proporcionará datos suficientemente precisos sobre las respuestas de las células endoteliales que recubren la pared arterial, porque las células son tan pequeñas con respecto a la pared arterial que la experiencia de la célula de la pared es como si vive en un mundo plano. El medio que fluye sobre la construcción carece de un componente vertical (el flujo es bidimensional) y es unidireccional, mientras que in vivo "se inclina alrededor en el vaso sanguíneo". Pero de nuevo el enfoque se centra en los efectos de primer orden a menos que haya evidencia de la necesidad de considerar efectos de orden superior, como si ellos encontraran "que hay un patrón completamente diferente de genes que están regulados por alto en cizalladura pulsátil, o algo, tal vez entonces sería más interesante utilizar diferentes construcciones y cosas", para poder afinar los efectos de orden superior.

La introducción de la construcción llevó a la organización de nuevos dispositivos para experimentar en ella directamente, como el biorreactor pulsable que fue diseñado para "imitar los movimientos de la pared de la arteria natural." Se utiliza para exponer las construcciones a cargas mecánicas con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas generales, lo que los investigadores llaman "ejercicio de las células." Preferiblemente, esto se hace en una etapa temprana de la formación de la construcción, poco después de la semilla en pasar a un manguito de silicio tubular preparado. In vivo, todo el movimiento de la pared arterial está condicionado al flujo sanguíneo pulsátil. Sin embargo, Con este biorreactor, que consiste en un depósito rectangular que contiene un medio fluido en el que las construcciones tubulares se sumergen y se conectan a los puertos de entrada y salida de las paredes del depósito, el fluido no se mueve por sí mismo. Más bien, las mangas se inflan con medio de cultivo presurizado, bajo control neumático (producido por una bomba de aire). El medio funciona como un líquido incompresible, similar a la sangre. Al presurizar el medio dentro de las mangas, se cambia el diámetro del manguito de silicio, produciendo tensión en las células, similar a la experimentada in vivo. Sin embargo, como sistema de modelos, "las mangas de silicio añaden el siguiente nivel de duda. [...] La construcción en sí no está viendo realmente la presión que hace la manga. Y debido a eso sabes— en realidad no ve una (una presión—— siente la distensión pero realmente no siente la presión. No tiene que soportar la presión. Esa es la idea de la manga. "Estas diferencias entre los modelos in vivo e in vitro surgen de la naturaleza de los propios dispositivos. La construcción en la actualidad no es lo suficientemente fuerte como para sostener las fuerzas reales del flujo sanguíneo pulsante y el biorreactor en sí ha sido diseñado sólo como un modelo funcional que logra un movimiento paralelo a través de diferentes comportamientos.

2.3.- Prevención de las plaquetas: experimentar con una construcción vascular modelo-sistema

En situaciones experimentales, los modelos tienden a estar en configuraciones entrelazadas, es decir, no como entidades aisladas, sino como relaciones particulares con otros modelos. El diagrama de la Figura 1 es una representación esquemática de nuestro análisis del sistema de construcción vascular para un experimento propuesto destinado a resolver el problema de la formación plaquetaria en construcciones, y la trombosis resultante.

El diagrama traza la construcción, manipulación y propagación de modelos dentro del sistema que constituye el experimento. En la Figura 1 los modelos implicados se resaltan por líneas gruesas.

El experimento es significativo porque constituye un primer paso en la dirección de la investigación in vivo en el sentido de que el modelo animal sirve como modelo para el sistema humano en el contexto del experimento. En este experimento se ha colocado una derivación exteriorizada que conecta la vena femoral y la arteria femoral de un babuino, para que una pequeña cantidad de flujo sanguíneo pueda ser desviada a través de una construcción durante un experimento. La sangre del babuino se inyecta con iridio para que las plaquetas sean visibles a través de la cámara gamma, un instrumento disponible comercialmente. Cada modelo físico está construido para representar y funcionar como un aspecto seleccionado del sistema cardiovascular, por ejemplo, los medios y construcciones representan se comportan como el entorno biológico del vaso sanguíneo y el bucle de flujo representa y actúa como las tensiones de cizallamiento en las paredes arteriales. Este experimento inicialmente planteó el rediseño de la cámara de bucle de flujo para aproximar mejor el modelo in vivo en el que las construcciones serían fluidas en forma tubular, lo que es necesario para implantarlas.

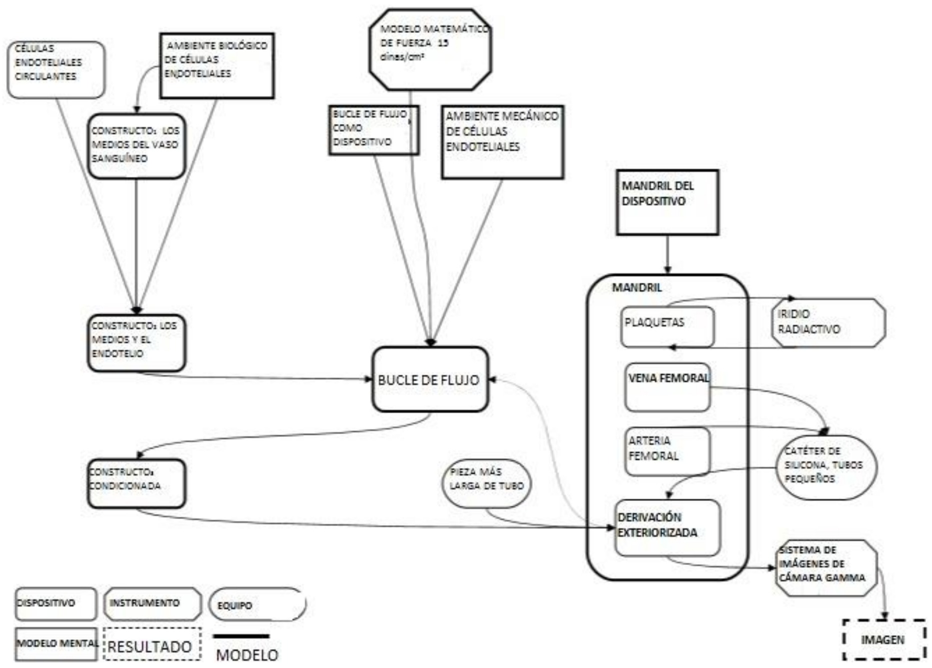


Figura 1. Un sistema de modelos de construcción vascular

Al final, esto resultó ser innecesario porque el investigador tenía la idea de que debería ser posible diseñar una derivación externa para el bucle de flujo —en una analogía directa con la derivación utilizada en el modelo del babuino— y adjuntarle la construcción para fluir. Durante las varias repeticiones de la simulación experimental a lo largo del tiempo, la fuerza con la que el medio fluyó a través de la construcción se ajustó hasta que cesó la formación de plaquetas.

En general, cada experimento con el sistema de modelos comprende una serie de modelos de interbloqueo, que incluyen al menos los siguientes: modelos comunitarios de fenómenos in vivo (biológicos, matemáticos, mecánicos); modelos físicos in vitro/ex vivo, de aspectos objeto de investigación; y modelos mentales de fenómenos in vivo e in vitro, dispositivos modelos qua in vitro/ex vivo, y dispositivos modelos de qua ingeniería. Cada modelo mental es tanto un logro individual como un logro comunitario. Tenga en cuenta, también, que los modelos de matemáticas, física y biología informan la construcción de los dispositivos. Retomamos a esta noción de modelos de interbloqueo y al razonamiento basado en modelos después de considerar los sistemas de modelos de Lab D.

3.- LABORATORIOS DE INGENIERÍA NEURAL: LOS "SISTEMAS DE MODELO DE PLATO INCORPORADO"

El laboratorio D es un laboratorio de investigación de neurociencia de vanguardia con el enfoque es entender la naturaleza biológica fundamental del aprendizaje y la memoria. Específicamente, están interesados en "plasticidad a nivel de red, aprendizaje y memoria" a nivel celular. Históricamente, la neurociencia se ha practicado en los dos extremos en el espectro de la granularidad. En un extremo hay neurólogos que buscan una comprensión grosera, en todo el sistema, psicológica del cerebro, y en el otro extremo hay electro fisiólogos de una sola célula que buscan entender las propiedades fundamentales de una neurona sola.

Sin embargo, Este laboratorio, se ve a sí mismo como un camino en la neurociencia de nivel "mezzo" (meso). Los investigadores están interesados en la naturaleza de la red de neuronas corticales, que son demasiado pequeñas y desorganizadas para ser consideradas un cerebro en funcionamiento, pero están en un nivel más alto de organización que la sola neurona. Los primeros intentos de investigar la naturaleza de las redes de neuronas dependían de cortar rebanadas de un cerebro, arreglar las neuronas (en formaldehído), y luego mirar la estructura física de las neuronas debajo de un microscopio. El Director del Laboratorio D no estaba contento con mirar las neuronas muertas y en su lugar quería "mirar a los seres vivos, mientras que las cosas interesantes sucederían". Con este fin, pasó muchos años diseñando y perfeccionando lo que se ha convertido en el modelo más prominente de Lab D: "El Plato", y también desarrollando tecnología para crear imágenes.

3.1 “El Plato”

En pocas palabras, "El Plato" es una red de neuronas corticales que viven, no como parte de un cerebro más grande, sino como una pequeña red en un plato de Petri. En la parte inferior de esta placa Petri hay 64 electrodos capaces de volver a cablear e inyectar actividad eléctrica en la red. La construcción básica del plato es la siguiente:

• El MEA: el Arreglo de Micro electrodos (MEA) es un plato pequeño, de vidrio, estilo Petri que tiene una rejilla de 8x8 de micro electrodos incrustados en la parte inferior de la misma. Los electrodos se meten hacia arriba desde la parte inferior del plato hacia las neuronas.

• Células: Dosis de laboratorio, consideraron partes de la corteza de una rata como su red. Los dos tipos básicos de células neurales, neuronas y glia (células de apoyo), se cosechan de la rata y luego se cultivan en este plato.

• Medio: Un cóctel azucarado de productos químicos biológicos utilizados para alimentar las células.

• La tapa: Una película delgada hecha de teflón se extiende sobre el MEA y se mantiene en su lugar por un grueso pedazo de "O" en forma de teflón (como piojos de tubería). El teflón se utiliza específicamente porque no es tóxico y permite el O_2 y el CO_2 a través para que las células puedan respirar. Sin embargo, no es poroso, por lo que mantiene todo lo demás (como bacterias u hongos) dentro o fuera, incluso cuando se estira.

No hay modelos establecidos de comunicación de neuronas. De hecho, el esfuerzo del Laboratorio D ha sido construir estos modelos desde cero, como lo expresó el Director del Laboratorio:

"Bueno, el nivel de modelado que me interesa mucho es el modelado en red. Así que hay un montón de gente por ahí que están haciendo un modelado muy detallado de las neuronas individuales, de hecho incluso [en] este laboratorio X e Y están haciendo eso, pero estoy mucho más interesado en lo que sucede cuando se toma un montón de células y hacer que interactúen entre sí, ¿qué tipo de propiedades emergentes aparecen. Por lo tanto, probablemente no sea necesario incluir todos los detalles que encontrarías en un modelo [de una sola neurona], con iones y cosas, pero puede ser, así que parte de nuestro trabajo es averiguar cuáles de los detalles de la biología son importantes en este tipo de propiedades de red y red de fenómenos y que son una especie de incidental.

Lo que está creciendo en el plato, entonces, no es un cerebro, ni siquiera es una rebanada de cerebro de una rata. En su lugar, las neuronas se desasocian (sus conexiones se rompen por separado hasta el punto de que se liberan entre sí), chapadas (procesadas y colocadas en el MEA), y luego cultivadas para que sus conexiones se permitan volver a crecer juntas. Como, un investigador describió su razonamiento para el uso del plato, en lugar de una rebanada de cerebro:

"Sí, una sola capa de neuronas. Tratamos de bajarlos en una monocapa. Esa es la idea. Entonces es un sistema más simple de estudiar. Es todo. Y también, quiero decir, usted podría hacer sectores que no son cultivos desasociados, pero el problema en las rebanadas es que es difícil mantenerlos. Tienes que conseguir el líquido correcto. A veces sólo las células externas — usted sabe que el medio no entra en las capas internas. La capa interna muere, pero las capas externas están bien, cosas así. Por lo tanto, es más difícil mantenerlos vivos. Y queremos estudiar a largo plazo, así que queremos mantenerlos vivos durante meses, años".

El plato como un modelo físico del cerebro de una rata que está limitado tanto por el estado de la comprensión actual del plato de Lab D, como por los obstáculos técnicos que no tienen nada que ver con el modelo biológico. En respuesta, Lab D ha optado por simplificar su modelo a una capa de neuronas solitarias para reducir el número de variables posibles en el sistema. Hacerlo les da un conjunto más pequeño de preguntas para hacer con el fin de construir su comprensión del procesamiento de red. Sin embargo, creen que este modelo simplificado proporciona una aproximación lo suficientemente cercana como para producir información válida.

El plato es el sistema de modelos central del laboratorio: la encarnación físicamente construida del modelo selectivo del laboratorio del cerebro. Es un modelo in vitro de procesos neurológicos básicos in vivo. Con un sistema neuronal in vivo existe una estructura específica para las vías y conexiones en las redes, creadas por los procesos de desarrollo del animal. Aquí, sin embargo, la estructura neural se destruye para que El Plato no refleje directamente ninguna estructura dentro de una rata viva. En consecuencia, hay cierta contención sobre lo que El plato realmente modela. Así que sostengo que El plato es "un modelo de columnas corticales", mientras que otros piensan que "es un modelo de desarrollo [del cerebro]", y cuando se presiona, algunos incluso admiten que "puede ser sólo un modelo de sí mismo". Sin embargo, todos están de acuerdo en que el estudio de El plato dará lugar a la comprensión del funcionamiento básico del procesamiento neuronal cortical a nivel de red, como se explica:

"En primer lugar, es un modelo simplificado, digo que el modelo no es, es artificial, no es como es en el cerebro, pero todavía creo que el modelo respondería a algunas preguntas básicas, porque la forma en que las neuronas interactúan debe ser la misma si es dentro o fuera del cerebro. ... Ya sabes, porque estamos en un entorno artificial, no es lo mismo, ya sabes, no es la misma concentración que está en el cerebro; nada es lo mismo. Estoy creciendo en un entorno externo. Pero, creo que se aplican las mismas reglas.”

El plato está diseñado para ser un modelo genérico de comportamiento y función de procesamiento cortical. Los investigadores no están tratando de entender el procesamiento de una construcción específica del cerebro de una rata en particular, En cambio están interesados en cómo las redes de neuronas en general, se comunican y procesan la información. Claramente hay una falta intencional de especificidad en este modelo con el fin de ser capaz de construir su comprensión del procesamiento neuronal en general. Sin embargo, esta comprensión genérica de las redes no es el objetivo final. Después de construir la base genérica de la comprensión, planean construir una comprensión más refinada de la comunicación neuronal. Según lo indicado por el Director del Laboratorio:

"Claramente falta muchas otras partes cerebrales que son importantes en lo que hacen los cerebros. Asumo que son importantes. Y en algún momento podríamos estar estudiando cultivos con diferentes partes cerebrales mezcladas, o piezas tridimensionales específicas que se juntan".

La construcción física del sistema-modelo no sólo enmarca la investigación, sino que también es una parte integral en el progreso de la investigación del laboratorio en su conjunto. Sólo una vez que los investigadores entienden su modelo físico actual y construyen un modelo abstracto preciso (mental, matemático, etc.) pueden progresar en la construcción de un nuevo modelo que se aproxime más a la situación in vivo.

La construcción del plato en sí se extiende a través de la biología, la química y la ingeniería eléctrica, y requiere que todo el esfuerzo dentro del laboratorio D sea interdisciplinario. Aunque la investigación de Lab D se centra en una entidad mayoritariamente biológica, está poblada en gran medida por miembros con antecedentes en ingeniería eléctrica e ingeniería mecánica, y no en biología o neurociencia. A diferencia del laboratorio A, no hay signos reveladores de biología: no hay matraces, no hay pipetas y no hay contenedores de residuos peligrosos. De hecho, aparte de un microscopio cubierto visiblemente y una incubadora que podría confundirse como una mini-nevera, el ritmo de Lab D se parece más a un laboratorio de computación que a cualquier otra cosa. Las características más llamativas del laboratorio son los cables copiosos que atraviesan el espacio que lleva las señales eléctricas producidas por las neuronas a los investigadores y sus computadoras.

Aunque todos los investigadores utilizan el plato, hay varias vías diferentes que se persiguen en este laboratorio, incluyendo estudios farmacológicos, estudios morfológicos (imágenes) y simulación con modelos computacionales y modelos físicos. Aquí iluminamos las investigaciones fisiológicas del laboratorio. El objetivo principal de la investigación es entender cómo "comunicarse" eléctricamente con la red de neuronas, y tratar de ver —de hecho para averiguar lo que cuenta como— evidencia de plasticidad de la red (aprendizaje). El núcleo del método consiste en estimular eléctricamente una red neuronal biológica y registrar la respuesta eléctrica del plato. Con este fin, la tecnología de electrofisiología en el Laboratorio D se centra en encontrar nuevas formas de "hablar" con el plato, y luego, a su vez, tratar de entender lo que el plato está "diciendo" de vuelta a ellos en respuesta. Vamos a describir tres maneras en que los experimentos se llevan a cabo con los sistemas de modelos de plato.

3.2.- "Hablar" con el plato: electrofisiología

El objetivo de la experimentación en la investigación de fisiología selectora del Lab D, es entender cómo se codifica y procesa la información en las redes del plato. Sería ideal de que tuviera lecturas directas de cada neurona en el plato. Sin embargo, con la tecnología actual esto es imposible. En consecuencia, el acceso al plato está mediado por un conjunto comparativamente pequeño de electrodos (el MEA). Las señales recibidas en última instancia son una representación de la actividad neuronal filtrada a través de varios modelos que se discutirán a continuación. Actualmente es imposible conocer la actividad neuronal real en el plato. Lo que estudian son los datos de "picos" registrados por los electrodos del MEA.

Históricamente, el término "picos" se refiere al rastro eléctrico dejado cuando una neurona individual se dispara. En la electrofisiología de una sola célula, es posible leer la actividad eléctrica directamente desde la neurona, y como consecuencia, el modelo para la coacción neuronal es bien conocido: hay un salto pronunciado en el potencial de voltaje cuando la neurona se despolariza (disparo), y luego un proporcional potencial a medida que la neurona se recupera. La neurociencia multicelular ha tomado prestada la noción de un 'pico', pero lo ha modificado para adaptarse a su situación. Los investigadores del laboratorio D estiman que la actividad eléctrica registrada en un electrodo solitario, puede provenir en promedio de tres a cinco neuronas diferentes. Cuando se trata de los rastros eléctricos de muchas neuronas, es posible (y es a menudo el caso) que varias neuronas alrededor de un solo electrodo se disparan simultáneamente. Como resultado, un pico puede representar realmente el disparo de más de una neurona. Sin embargo, debido al hecho de que ellos solo aprecian un trazo, es imposible distinguir entre el disparo de una neurona solitaria y los disparos de múltiples neuronas. Esta concepción alterada de lo que representa un pico se comparte entre los miembros del laboratorio. Históricamente, los picos fueron etiquetados a mano. Sin embargo, Lab D ha creado un proceso automatizado de identificación de picos al haber desarrollado una pieza de software que se llama el "Detector de picos". El detector de picos encarna el modelo del laboratorio de un pico que incluye la "altura" del pico (diferencia de la tensión media) en relación con el ruido en el electrodo y el "ancho" (duración) del cambio, junto con algunas otras características más sutiles. El detector de picos comprueba el voltaje que coincide con este modelo de cómo debería lucir el pico, etiqueta el pico y mantiene una instantánea de la actividad eléctrica inmediatamente alrededor del pico. Los investigadores comienzan su análisis con los datos de picos filtrados.

Los datos que los investigadores utilizan en última instancia, no provienen directamente de los procesos neuronales en el plato. Hay varias piezas de software, como el detector de picos, que se utilizan durante los experimentos electrofisiológicos. Estas piezas de software se conocen colectivamente como "filtros" y realizar una serie de transformaciones diferentes en los datos neuronales sin procesar, antes de que la información llegue alguna vez al investigador. Cada uno de estos filtros encarna un modelo de un aspecto de los datos neuronales. Es posible que los filtros pierdan disparos neuronales reales, o detecten un salto en las lecturas que no corresponde a ningún potencial de acción (es decir, proporcionar un falso positivo). Por lo tanto, el significado de un pico individual debe entenderse en términos de los algoritmos de filtro que lo crearon, es decir, en términos de la serie de transformaciones utilizadas para producir los datos, cada una de estas transformaciones se construye sobre un modelo del señales eléctricas seleccionadas. Los investigadores son íntimamente conscientes de estos procesos y realizan sus análisis a la luz de este entendimiento.

En la forma más sencilla de análisis, los datos de pico se transforman en una visualización representada en una pantalla de ordenador. Hay una serie de diferentes tipos de visualizaciones que el laboratorio utiliza para estos datos básicos, y mucho más para sus transformaciones analíticas de nivel superior. Las visualizaciones más simples provienen del software de captura de datos que han desarrollado llamado "Consola MEA". Como el ordenador está capturando datos neuronales, Consola MEA puede mostrar la actividad neuronal en tiempo real. La pantalla Consola MEA se divide en 64 rectángulos (uno para cada electrodo de grabación) y dispuesto para que coincida topográficamente con el diseño de los electrodos en el plato. Cada rectángulo, entonces, muestra un rastro de las señales eléctricas capturadas en el electrodo. Cuando el detector de picos está activado, la herramienta de visualización coloca pequeños puntos rojos en los picos para facilitar la identificación visual.

La capacidad de los investigadores para "ver" la actividad eléctrica del plato, entonces implica una serie de modelos mentales, físicos y algorítmicos interconectados. La visualización es una representación de la información producida por los filtros. Los filtros son modelos de instancias de la comprensión de Lab D sobre las señales neuronales. Las señales en sí mismas son un modelo de comunicación neuronal (ya que abstraen de una manera otros factores como la señalización química). Finalmente, el plato en sí es un modelo de funcionamiento neuronal en corteza de rata. Esta serie de modelos de interbloqueo es el sistema de modelo base para cualquier experimento electrofisiológico que se ejecute dentro de Lab D. Sin embargo Esta configuración experimental es uno de los sistemas de modelos más básicos utilizados en el laboratorio. En la siguiente sección describiremos dos sistemas de modelos de "plato incorporado" mucho más complejos: el "Animat" y el "Hybrot".

3.3 Realización computacional: modelos de sistemas animados

> "De la manera tradicional de hacer fisiología in vitro ... lo más cercano al comportamiento son pequeñas ondas en la pantalla del osciloscopio. No tiene nada que ver con ningún comportamiento, excepto la luz en la pantalla allí. Y no hay ninguna entrada sensorial que no sea pulsos eléctricos a través de un par de electrodos. Estaba muy desconectado, y una de las cosas que realmente estaban dando forma a mi pensamiento en ese momento era este libro aquí. Este es el primero de un procedimiento de esta conferencia: simulación del comportamiento adaptativo, aquí. Y, creo que fue 1990 que tuvieron esta conferencia, sí. [Todas las personas de ese libro están simulando animales o lo que llaman "Animats". El término fue acuñado en esa época por los chicos que estaban en esta conferencia. Estaban simulando estas cosas en la computadora o estaban construyendo robots que eran simulaciones de animales. Estaban continuamente rehaciendo la importancia de la realización y la ubicación".

Originalmente entonces, la idea de los sistemas de modelos animados desarrollados en el laboratorio D, provenía del dominio del modelado computacional. Allí el objetivo era crear un modelo muy simple "mundo" y un modelo muy simple "animal" y luego simular la actividad del "animal" en el "mundo". El Director del Laboratorio tomó prestada esta idea de modelar animales, pero decidió que podía mejorarla. Mientras que otros estaban usando un animal completamente simulado computacionalmente, se propuso hacer un modelo más realista de un animal usando el plato como el "cerebro".

El término "animat" en el laboratorio D se refiere a una entidad simulada computacionalmente controlada por la actividad en un plato. Este sistema modelo imita el hecho de que el aprendizaje in vivo se encarna, es decir, proviene de la estimulación sensorial y la retroalimentación. Un animat consiste del plato (el "cerebro" del animal computacional) y dos programas de traducción: uno diseñado para ser el aparato de entrada sensorial simulada y otro para simular la salida del motor que existe en un entorno simulado. En resumen, los animadores se utilizan para simular la realización de las redes neuronales y se utilizan como un modelo primitivo de un animal que funciona en el mundo.

En la descripción de la configuración experimental que desarrollamos en la última sección, las señales eléctricas producidas por las neuronas fueron simplemente grabadas y luego analizadas. Esto se conoce típicamente como electrofisiología de "bucle abierto". Los animados, por otro lado, son parte de la "electrofisiología de bucle cerrado". Cerrar el bucle simula el aprendizaje encarnado. Las señales eléctricas producidas por las neuronas no se registran simplemente. En su lugar, se transforman en algún significativo camino experimental y luego se alimentan de nuevo en el plato. La información "sensorial" se ejecuta a través de un programa de traducción que la convierte en un patrón de estimulación para ser administrada por una placa de estimulación. La estimulación produce una respuesta eléctrica en el plato que se registra y se ejecuta a través de un programa de traducción separado, que convierte las señales en comandos "motor" para el animador. Los comandos motores mueven el animador en su "mundo" que, a su vez, produce un cambio en la información "sensorial". El cambio en la información sensorial se lee de nuevo de los electrodos en el plato, y el bucle continúa.

> "Hay muchos argumentos diferentes para ello. Creo que probablemente uno de los mejores argumentos es ... si nos fijamos en lo que las neuronas hacen que ... aprenden cosas. Y eso es lo que estamos tratando de averiguar... cómo funciona el aprendizaje, cómo funciona la memoria. Así que si tenemos neuronas en un plato, queremos verlas aprender algo... hacer asociaciones... es un poco más obvio ver ... el aprendizaje involucrado en un bucle cerrado [situación].' Porque usted define lo que va a aprender basado en ... el cuerpo que le das y el entorno en el que le permites trabajar".

Como expresa el investigador, los animat proporcionan un sistema modelo para estudiar la relación entre la naturaleza fundamental del procesamiento de información en las neuronas y el comportamiento visible de los animales. El modelo-sistema animado sirve para demostrar la plasticidad de la red de manera más convincente que los experimentos de bucle abierto, y, a su vez, conducirá a una mejor comprensión de cómo interpretar y controlar la actividad en el plato. Así como hay muchos tipos diferentes de criaturas en el mundo real, Lab D ha creado toda una familia de modelos de animats, uno de los cuales es una "instrucción" simulada. Aquí consideramos brevemente la construcción y el uso de D_2 del sistema modelo de polilla. Según lo concebido por el investigador,

> "El modelo original es básicamente, tengo un círculo y luego el centro del círculo, que este es el entorno. El centro del círculo, donde se puede encontrar, lo que se puede pensar como una luz... y yo quería la instrucción, la polilla, que sería el animat, se movería hacia la luz como lo hacen las polillas".

En el caso que analizamos, la visualización de la pantalla comprende un círculo que limita la totalidad del mundo de la polilla, un punto en el centro representa la "luz" simulada y las líneas a través del círculo representan los caminos que la polilla ha seguido durante la duración del experimento. A la polilla se le dio un "ojo" simulado para "ver" la luz y la capacidad motora simulada para moverse en el "mundo".

Las dos partes más interesantes de cualquier experimento animado son los programas que interpretan las señales neuronales. El programa de traducción sensorial permite al sistema sensorial de la polilla "ver" dónde estaba la luz y "ver" dónde está, y convierte esta información en una serie de señales neuronales al igual que un sistema sensorial animal. Una vez que el plato es estimulado por esta entrada sensorial, responde con su propia actividad eléctrica. Esta actividad es registrada y procesada por el método descrito en la sección de electrofisiología, y luego traducida en comandos motores para la polilla. Por ejemplo, la actividad neuronal se puede tratar como un vector de población; en otras palabras, cada electrodo se toma para representar una posible dirección de movimiento. La actividad a la izquierda del plato indicaría que la polilla quería moverse a la izquierda; actividad a la derecha significaría que la polilla quería moverse a la derecha; y pronto, en esencia, la red en su conjunto, determina en qué dirección ir en función de la entrada sensorial. Es importante destacar que los programas del traductor surgen de una serie de modelos diferentes. En primer lugar, los programas son un modelo de cómo D_2 entiende la comunicación neuronal, y por lo tanto el algoritmo de traducción es una ejemplificación de su idea sobre cómo las neuronas se comunican. Además, juntos, los programas del traductor forman una aproximación básica de cómo funciona el sistema motor sensorial de un animal.

En resumen, un animat, como el sistema modelo de polilla, es una simulación in vitro de un modelo in vivo de procesamiento neuronal que requiere "Encarnación", entorno y retroalimentación sensorial-motora continua. El programa de traducción sensorial deriva de un modelo de comprensión del investigador de cómo los sistemas sensoriales animales traducen la información sensorial cruda en información significativa para la corteza para procesar. El componente Plato, en sí mismo, es un sistema de modelos que representa el procesamiento neuronal básico. El programa de traducción motora encarna un modelo de cómo el sistema de motores de un animal convierte la salida neuronal puesta en motor función. Por último, tomando el modelo-sistema en su conjunto, el animat experimental es un modelo simplificado de un animal del mundo real.

Ejecutar este sistema-modelo y analizar el resultado del experimento no es el final de la historia. Al igual que con la mayoría de los sistemas de modelos en este tipo de comunidades de vanguardia, el sistema de animat está en constante evolución. Usando los resultados de la primera polilla, el investigador revisó su comprensión del procesamiento neural y, a su vez, revisó su modo de polilla. Después de ejecutar la polilla varias veces, actualizó el sistema de control sensorial, en particular, "simplificó eso aún más sólo para tener frecuencias sólo dependientes de la producción X positiva... Sólo para hacerlo, más fácil de analizar en el análisis de datos... Sólo para tratar de simplificar todo. Podría decir: 'Bien, esta parte de la estimulación hace esto'". Al igual que con la decisión del laboratorio de utilizar cultivos monocapa, aquí el investigador eligió diseñar un modelo menos realista, pero más fácil de entender. Esta abstracción de casos limitantes de un animal da a los investigadores menos grados de libertad, pero proporciona preguntas y experimentos más claramente definidos que proporcionan resultados menos complejos y más fáciles de interpretar.

3.4.- Realización física: sistemas modelo Hybrot

> "Así que el punto es que estos cultivos son básicamente el modelo del cerebro, cierto. El punto es tener una encarnación para estos cultivos que es básicamente un robot. Así que, usted... Tenemos un robot en la otra habitación donde se puede montar este cultivo en la parte superior de ella y básicamente se puede programar el robot para hacer cosas, y ver cómo cambia el comportamiento. Así que básicamente, el comportamiento del robot controla la entrada al plato ... y cómo interactúa. Así que tenemos al robot corriendo en algún tipo de entorno haciendo sus cosas, de acuerdo con algún algoritmo que establecemos, que con suerte hace algo de aprendizaje, y luego vemos cómo el comportamiento del robot cambia con el tiempo".

Un "hybrot" (una contracción de "robots híbridos") proporciona otro tipo de modelo-sistema experimental encarnado para el aprendizaje de neuronas. Al igual que un animat, un hybrot proporciona un modelo genérico de animales. Sin embargo, Hybrot lleva esta idea un paso más allá, y colocar el "cuerpo" para la red de neuronas en el mundo real en lugar de en una simulación computacional. En lugar de tener un entorno simulado con entrada sensorial simulada y salida de motor simulada, el plato recibe un sistema sensorial físico en el mundo real con capacidades motoras reales, y por lo tanto proporciona una simulación física de los procesos in vivo. Hay varios "cuerpos" robot utilizados en el laboratorio D, algunos comprados en la estantería como el "Koala", y otros que se construyen desde cero en el laboratorio, como una serie de "plumas de baile". El sistema modelo predominante e interesante de Hybrot utilizado por el Laboratorio es un brazo mecánico que se distribuye físicamente en esa parte de él que reside fuera del espacio físico del laboratorio. Es capaz de dibujar imágenes (primitivas) que reciben el nombre "MEArt."

MEArt fue diseñado como un proyecto de arte y un proyecto de investigación con el objetivo de llevar la idea de un sistema híbrido neuro mecánico al público. Se trata de "un proyecto de investigación y desarrollo bio-cibernético geográficamente separado que explora aspectos de la creatividad y el arte en la era de las nuevas tecnologías biológicas desde perspectivas artísticas y científicas". Como una exposición, MEArt es, a tono de burla, considerado como un "artista semi-viviente" que utiliza neuronas para controlar un brazo mecánico que dibuja garabatos en un pedazo de papel. Como objeto de investigación, es un sistema de modelos de electrofisiología de bucle cerrado que, a diferencia del animat, tiene una realización física. El sistema de modelos se construye de la siguiente manera: una cámara web se utiliza como ojo de MEArt, la información de la cámara se ejecuta a través de un programa de traducción sensorial, el programa estimula el plato, este responde a esas señales enviando instrucciones través de un programa de traductor de motor, el traductor emite comandos motores al brazo, y finalmente el brazo se mueve y dibuja una línea en un pedazo de papel.

El sistema de modelos MEArt sirve como modelo de un brazo in vivo abstraído a lo largo de una serie de dimensiones. Por ejemplo, los únicos tipos de información disponibles para MEArt son la información posicional de su brazo y la información sensorial de su cámara. Todas las demás dimensiones sensoriales y posibles estados internos se han abstraído. Aun así, la limitada cantidad de incertidumbre y complejidad introducida por la interacción con el mundo real a lo largo de estas dos dimensiones dan a los investigadores un modelo que se aproxima más a la entrada neuronal real que los sistemas de modelos animat. Como lo expresó un investigador:

> "Sí. Lo he hecho en simulación. Ese suele ser el primer paso... Sólo hazlo en simulación para tener una idea... Supongo que uno de los puntos es que una vez que se pega algo en el mundo real... y operando... estás agregando cosas que no puedes predecir de antemano. Y cuando como... Rodney Brooks hizo eso con robots, con IA, puso IA en robots, descubrió muchas cosas diferentes que no se habrían descubierto con sólo simulación".

Hay un animat MEArt que los investigadores utilizan primero para simular el comportamiento probable del brazo. Pero entonces el hybrot es creado para existir en el mundo real. El objetivo de la simulación computacional anterior es restringir los grados de libertad firmemente en sus aspectos físicos, con el fin de localizar las pruebas del modelo. Una vez que el modelo general se construye a partir del animat, el modelo hybrot sirve para explorar la validez del modelo en el mundo real.

Tal vez, entonces, lo más interesante de los hybrots es que difuminan las líneas entre los mundos in vitro e in vivo. Sí, son claramente in vitro en el sentido de que las neuronas existen fuera de su contexto natural y viven en un entorno artificial. Sin embargo, el propósito del sistema modelo hybrot es acercar las neuronas a su entorno natural. El objetivo del sistema en su conjunto es modelar más de cerca la construcción real de un animal, y en consecuencia la entrada neuronal. En este sentido, se puede ver el sistema de modelos MEArt como una entidad que funciona en el mundo in vivo, así como un modelo in vitro de aprendizaje de neuronas encarnadas. A través de la construcción de hybrots, Lab D prueba no sólo si funcionan o no simplemente como robots, sino mediante la creación de modelos físicos que se aproximan cada vez más exactamente a su comprensión de un animal real, exploran físicamente y prueban su modelo animal de procesamiento neuronal.

Al igual que con el laboratorio A, en el laboratorio D los modelos experimentales, también, tienden a estar en configuraciones entrelazadas, como relaciones en particular con otros modelos. El diagrama de la Figura 2 es una representación esquemática de nuestro análisis del sistema de modelos MEArt.

Como se puede ver en la Figura 2, MEArt es un complejo sistema de modelos que implica varios modelos físicos y mentales diferentes (modelos mostrados con contornos negros gruesos), instrumentos y dispositivos que convergen y se entrelazan alrededor del hybrot MEArt. Al igual que el sistema de modelo de construcción vascular que se muestra en la Figura 1, aquí rastreamos los pasos por los cuales la información se genera, manipula y propaga a través del sistema. Sin embargo, en lugar de seguimiento de transformaciones físicas, rastreamos las transformaciones de información a medida que se interpretan a través de cada uno de los modelos instanciados. Tenga en cuenta que, aunque el diagrama detalla el sistema MEArt, un diagrama para el sistema de modelos Animat sería idéntico, guardar para reemplazar "Entorno del mundo real" por "Entorno simulado", y "Sistema sensorial" por "Sistema sensorial simulado". Puesto que este es un sistema de bucle cerrado, no hay un punto de inicio real, pero el mejor lugar para comenzar es con el sistema sensorial (a la derecha de la figura). Aquí, la información sensorial cruda sobre el mundo, es recopilada por una cámara de video y sensores posicionales para el brazo. Esta información se envía entonces al "Programa de transformación de actividad a actividad." Aquí, los datos sin procesar se transforman en comandos estimulantes que alimentan la información al Plato. Como se mencionó anteriormente, este programa sirve como un enclavamiento in silico (circuitos de silicio) de los modelos. Es a la vez una creación de instancias del modelo mental del investigador de cómo los datos sensoriales están estructurados por un sistema sensorial in vivo y una creación de instancias del modelo mental del investigador, de cómo la información es interpretada y procesada por el propio Plato. A continuación, el programa dirige a un estimulador para inyectar un patrón de cambios de voltaje en el plato, dándole su entrada "sensorial". En respuesta a la estimulación, el plato crea una serie de impulsos eléctricos a medida que procesa la información.

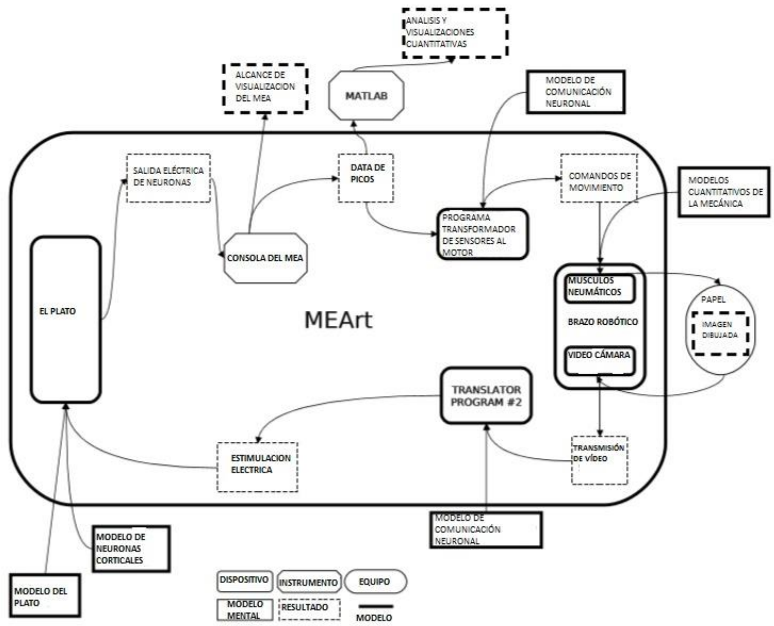


Figura 2.- Sistema del modelo. MEArt

Esta respuesta es recogida por la tarjeta de adquisición de datos, y se alimenta a través del sistema consola MEA. Como se mencionó anteriormente, los datos sin procesar se someten a una serie de filtros, cada uno de los dos un modelo con instancias para procesar la actividad neuronal. Los datos de pico subsiguientes se introducen en un segundo programa "Actividad a la transformación del motor" que transforma los datos en comandos que impulsan la salida del motor del hybrot. Aquí de nuevo tenemos una convergencia de modelos de comunicación neuronal instancias in silico, sólo que esta vez los modelos son los de la respuesta neuronal y la actividad motora. A continuación, el hybrot físico (el modelo de un "animal") produce un cambio físico en el mundo dibujando en una hoja de papel. El dibujo en sí, aunque posiblemente estéticamente interesante, también sirve como una representación (visualización) de los procesos subyacentes que lo produjeron. Finalmente, los cambios físicos en el entorno son recogidos por el sistema sensorial, y el bucle se cierra.

Significativamente, podemos ver una serie de diferentes niveles de modelos de enclavamiento en este sistema-modelo. En primer lugar en el nivel más bajo están las transformaciones fundamentales que impulsan el hybrot. Al más alto nivel, tenemos el sistema MEArt en su totalidad, como un modelo de instancias físicas de un sistema de procesamiento neuronal del mundo real, e incluso un modelo físico selectivo de un animal del mundo real. Juntos, los investigadores con el sistema modelo MEArt son capaces de hacer inferencias sobre la relación entre la plasticidad (aprendizaje neuronal) y el aprendizaje (comportamiento animal). Como podemos ver aquí, los investigadores utilizan eficazmente MEArt para hacer inferencias a través del propio sistema modelo.

4 .- RAZONAMIENTO BASADO EN MODELOS

La ingeniería biomédica es una empresa interdisciplinaria. El resultado programático de la ingeniería biomédica son artefactos de ingeniería construidos al menos en parte a partir de componentes biológicos. En los casos que examinamos, estos incluyen un sustituto real de los vasos sanguíneos (como en el laboratorio A de ingeniería de tejidos) y un cultivo de neuronas entrenadas para operar un robot (como en el laboratorio D de ingeniería neuronal). En particular, se trata de objetos epistemológica y ontológicamente híbridos, que se diseñan simultáneamente y son biológicos. Estos sistemas-modelo pueden ser análogos estructurales, conductuales o funcionales (sentido inclusivo de 'o') de los sistemas biológicos del mundo real. En gran medida, reflejan la perspectiva de diseño del ingeniero. El siguiente pasaje de una entrevista con el Director del Laboratorio A es ilustrativo:

> LD: "Bueno, me quedó claro al leer la literatura que, y lo que realmente me motivaba para 1970-1971, era el hecho de que estas características del flujo sanguíneo [fuerzas mecánicas] en realidad estaban influyendo en la biología de la pared de un vaso sanguíneo. Y aún más que eso, la forma en que se diseña un vaso sanguíneo".
>
> Entrevistador: "Entonces, esto estaba influyendo en las características de la biología"

LD: "Sí, cierto, e influyendo en los procesos biológicos que estaban llevando a la enfermedad. La forma en que se diseña un vaso sanguíneo es que tiene un revestimiento interno, llamado endotelio. Es una monocapa; lo llamamos una monocapa de células porque es una célula gruesa. Pero es la capa celular la que está en contacto directo con la sangre que fluye. Por lo tanto, tenía sentido para mí que si había esta influencia del flujo [fuerzas mecánicas] en la biología subyacente de la pared del recipiente, que de alguna manera ese tipo de célula tenía que estar involucrado, el endotelio. "

Desde el principio, conceptualizó el recipiente in vivo desde la perspectiva de diseño de un ingeniero. Se dio cuenta de lo difícil que fue durante muchos años conseguir que los biólogos estudien el sistema cardiovascular incluso para estar interesados en la posibilidad de que las fuerzas mecánicas jueguen un papel en la enfermedad. A través de procesos de diseño, construcción, manipulación y modificación de los sistemas-modelos in vitro los ingenieros razonan, hacen hipótesis y logran la comprensión de los fenómenos biológicos in vivo. El desarrollo de un modelo mental inicial de un vaso sanguíneo en términos de fuerzas mecánicas, por ejemplo, llevó a la inferencia de que la respuesta de las células endoteliales al flujo estaba implicada en los procesos de la enfermedad. El desarrollo de los modelos físicos de las fuerzas mecánicas y de los vasos sanguíneos ha llevado, por ejemplo, a inferencias sobre la expresión génica en condiciones de flujo específicas.

En esta sección abordamos:

1) la naturaleza multidimensional de los modelos de enclavamiento;

2) la naturaleza de la inferencia basada en modelos; y

3) cómo es que las simulaciones in vitro apoyan inferencias sobre fenómenos in vivo.

4.1.- Modelos de enclavamiento

Los sistemas de modelos comprenden configuraciones de modelos híbridos de bio-ingeniería. En el área de la ingeniería de tejidos, por ejemplo, algunos de estos modelos se refieren a aspectos fisiológicos, que pueden incluir modelos mentales de las estructuras o de las funciones de los aspectos vasculares y modelos físicos que inter relacionan la estructura y la función a ese nivel. Otros modelos se refieren al nivel celular o tisular, que puede referirse de nuevo a la morfología respectiva o a aspectos de la bioquímica a ese nivel y a sus interrelaciones. Otros apuntan a modelos matemáticos y especificaciones de ingeniería que pueden servir para restringir aún más las opciones de diseño, la experimentación o la comprensión de la biología en investigación.

Los modelos son sitios de inversión de recursos sería y a largo plazo, y definen y delimitan el programa de investigación. Un dispositivo (un modelo individual) conduce a la creación de nuevos dispositivos para formar varios sistemas de modelos que ofrecen situaciones experimentales potenciales, como ocurrió después de la introducción de la construcción, que a su vez llevó al nuevo biorreactor o el Plato, que llevó a la construcción de los animat e hybrots. Como podemos ver en todos nuestros casos de sistemas de modelos, la realización de experimentos con mayor frecuencia requiere configuraciones complejas de modelos. Intentamos capturar este tipo de interconexiones y más con la noción multidimensional de modelos entrelazados. Los dispositivos sirven como concentradores para los modelos de enclavamiento a lo largo de muchas dimensiones. Los modelos entrelazan conceptos, métodos y materiales biológicos y de ingeniería (mezcla interdisciplinaria). Los modelos inter bloquean su diseño y construcción (como la modificación del bucle de flujo debido a la construcción y la construcción que conduce al biorreactor pulsante). Modelos inter bloqueo en el diseño experimental. Los modelos mentales y físicos se entrelazan en la inferencia basada en modelos. Además, los modelos entrelazan la investigación y el aprendizaje, y sirven como sitios de integración cognitiva y sociocultural.

Dos dimensiones de enclavamiento merecen un aviso especial. En primer lugar, en estos laboratorios de ingeniería donde el diseño y el rediseño es una agenda general, una dimensión significativa del interbloqueo es histórica: la "historia" debe entenderse aquí como intelectualmente "manos a la obra", que está significativamente relacionada con el trabajo con dispositivos. Los dispositivos actuales enclavan dispositivos anteriores y futuros. El rediseño de los dispositivos en el laboratorio está integrado en una comprensión de cómo una determinada situación problemática ha llevado a la realización de ciertas opciones de diseño. En otras palabras, la agenda de rediseño característica de un laboratorio de investigación de ingeniería requiere que los investigadores se apropien de parte de su historia a medida que avanzan en su investigación. El diseño actual se entiende que está condicionado, a la situación problemática tal como existía para el laboratorio en un momento anterior, incluso si la situación no es plenamente conocida por los investigadores actuales. Por lo tanto, dentro del rediseño del laboratorio hay una agenda, y con ella la historicidad de los artefactos se convierte en un recurso para nuevas opciones de diseño.

En segundo lugar, los dispositivos y los sistemas de modelos son modelos físicos que se entrelazan no sólo con varios modelos comunitarios, sino que también son representaciones externas que se entrelazan con cualquier representación mental que utilicen los investigadores en los procesos de razonamiento. Al igual que con otras representaciones externas como diagramas y bocetos, los modelos físicos restringen y proporcionan prestaciones que aumentan las representaciones internas que participar en los procesos de resolución de problemas. Este no es el lugar para argumentar o el punto, pero Nersessian [2002; 2008] avanza con la hipótesis de que las estructuras de representación internas también son modelos —modelos mentales - (representaciones analógicas estructurales, conductuales o funcionales) que permiten razonamiento basado en modelos simulados. Dado que la función prevista de las simulaciones físicas con sistemas-modelos es epistémica, son integrales en los procesos de modelado mental del investigador.

4.2.- Inferencia basada en modelos

Aquí delineamos los tipos de razonamiento que se pueden llevar a cabo a través de sistemas modelo. Caracterizando un modelo, libremente, como una representación de un sistema con partes interactivas con representaciones de esas interacciones, una instancia de razonamiento basado en modelos:

1) Implica la construcción o recuperación de un modelo,

2) Deriva inferencias a través de manipulación del modelo, y

3) Esas inferencias pueden ser específicas o genéricas, es decir, pueden aplicarse al modelo en particular o al modelo entendido como un tipo de modelo, que representa a los miembros de una clase de fenómenos. El sistema de modelos bio-diseñado es tanto un sistema físico conceptual como un sistema físico in vitro que representa el sistema in vivo objeto de investigación. Como tal, es una abstracción —selectiva y esquemática de la naturaleza— que representa dimensiones de fenómenos biológicos de interés para los investigadores. Los modelos son interpretaciones de fenómenos "meta" (por ejemplo, fuerzas dentro del sistema vascular humano, aprendizaje en el cerebro) construidos para satisfacer las limitaciones extraídas del dominio del problema objetivo (por ejemplo, la biología y la física del sistema vascular, el procesamiento de información llevado a cabo por el cerebro) y, a menudo, uno o más dominios de origen (por ejemplo, los dominios cardiovasculares y de ingeniería del bucle de flujo, los dominios de electrofisiología e ingeniería del plato). Las restricciones incluyen: espacial, temporal, topológica, causal, material, categórica, lógica y matemática. ¿Realizar una simulación puede dar lugar a nuevas restricciones o a reconocer restricciones que pasas por el usuario? Las inferencias realizadas a través de simulaciones pueden proporcionar nuevos datos e hipótesis que desempeñan un papel en la valoración y revisión de modelos para cumplir con las restricciones o proporcionar una nueva comprensión potencial en fenómenos in vivo.

Para los sistemas de modelos como los que hemos estado estudiando, los modelos son análogos estructurales, funcionales o conductuales de objetos físicos, entidades o procesos utilizados en situaciones experimentales. Estos modelos representan de manera demostradora (a diferencia de la descriptiva). La principal relación de evaluación entre el modelo in vitro y lo que representa es la bondad del ajuste, es decir, qué tan bien captura las dimensiones destacadas in vivo. Los modelos adecuados deben ser del mismo tipo con respecto a las dimensiones destacadas de los fenómenos objetivo (a menudo tomando varias iteraciones para lograr este objetivo). Las inferencias se derivan a través de manipulaciones del modelo. Las operaciones en modelos requieren transformaciones coherentes con las restricciones del dominio. Es importante destacar que los tipos de procesos de razonamiento en la inferencia basada en modelos incluyen, aunque no se limitan a (no ordenado): *abstracción* (caso limitante, genérico, aproximación, idealización, generalización); *simulación* (inferir resultados o nuevos estados a través de la manipulación de modelos (mental, físico, computacional)); *evaluación* (bondad de ajuste, poder explicativo, implicaciones); y *adaptación* (satisfacción de restricción, coherencia, verosimilitud).

La selectividad en el diseño de modelos permite el intercambio de características (potencialmente) irrelevantes y centra la atención en las relevantes para el contexto de resolución de problemas. Las restricciones pertinentes deben determinarse para los dominios de destino y de origen. Los procesos de abstracción y evaluación no tienen en cuenta factores irrelevantes. Los modelos construidos pueden crear instancias de factores irrelevantes, pero razonar correctamente a través de un modelo requiere reconocerlos como andamios para los factores cognitivamente germinantes. Como se ha señalado, los diferentes tipos de procesos de abstracción subyacen a la selectividad y los que figuran en la construcción del modelo, en particular, incluyen: idealización, aproximación, caso limitante y abstracción genérica. Estos proporcionan diferentes medios de centrarse selectivamente en características relevantes para la resolución de problemas mientras se suprime la información que podría inhibir el proceso. La supresión y la alta iluminación selectiva de las características proporcionan formas de representar el problema de una manera cognitivamente manejable. Lo más importante es que para la innovación conceptual, permiten la integración de información de diferentes fuentes.

La idealización es una estrategia común para relacionar las representaciones matemáticas con los fenómenos. Pensar en los lados de un triángulo como tener ancho cero, desde la perspectiva de una figura geométrica, o la masa de un cuerpo como concentrado en un punto, desde la perspectiva de determinar el movimiento, permite la aplicación estricta de fórmulas matemáticas. Una vez matematizada, la idealización proporciona un punto de partida desde el cual añadir información sobre fenómenos del mundo real como se considera relevante para un problema. Limitar las abstracciones de mayúsculas y minúsculas implica una extrapolación o reducción de un mínimo. La aproximación proporciona un medio para descontar la relevancia de las diferencias. Una aproximación estándar en física es la "aproximación de primer orden" utilizada al aplicar una representación matemática, como con la fuerza del flujo modelado por el dispositivo de bucle de flujo. Básicamente, se supone que cualquier efecto de orden superior es probable que sea irrelevante o que sea tan complejo que haga que el análisis sea intratable. Un flujo laminar —uno sin corrientes ni remolinos— proporciona una aproximación de primer orden suficiente para resolver problemas relacionados con muchos fenómenos dinámicos de fluidos. Algunas abstracciones son deliberadas, como vimos en la elección de utilizar flujo laminar constante en lugar de pulsátil y en la aproximación que el flujo es 2D y sobre la superficie plana de las construcciones. Algunas abstracciones ocurren porque los dispositivos también son sistemas en sí; poseer restricciones de ingeniería que a menudo requieren simplificación e idealización no derivadas específicamente del sistema biológico que están modelando, como vimos con el diseño y la construcción del Plato. Un mencionado antes, El Plato sólo proporciona una red monocapa de neuronas en lugar de las ricas conexiones 3D que se encuentran in vivo. Aquí, los investigadores han reducido la complejidad del plato al mínimo a lo largo de una dimensión física. La opción de utilizar sólo redes monocapa supera dos obstáculos. En primer lugar, la tecnología de grabación se limita a una rejilla monocapa 8x8 incrustada en la parte inferior del Plato. Cualquier neurona que no estuviera en la capa inferior del plato no sería accesible para grabación. De esa manera, desde la perspectiva del análisis de datos, la monocapa proporciona una reducción razonable de la información, manteniendo al mismo tiempo las cualidades más destacadas de la comunicación entre neuronas. Este caso limitante hace que la interpretación de la respuesta eléctrica sea manejable, tanto física como informativa. Pero entonces, los investigadores siempre necesitan ser conscientes de cómo las abstracciones pueden influir en los otros modelos con los que se entrelazan en situaciones experimentales.

Aunque los procesos de abstracción a menudo ocurren en tándem, diferenciarlos sirve para llamar la atención sobre un tipo de abstracción que es especialmente productiva en la fusión de restricciones de múltiples fuentes. Por ejemplo, al considerar el comportamiento de un sistema físico, como un resorte, los científicos a menudo dibujan una instancia específica, pero luego razonan con él como sin especificidad en cuanto al número y ancho de las bobinas. Para razonar al respecto como un oscilador armónico simple genérico requiere, además, suprimir las características de su estructura de resorte y comportamientos. Llamamos a este proceso abstracción a través de modelado genérico o, simplemente, abstracción genérica. En el razonamiento basado en modelos, las restricciones extraídas de diferentes fuentes deben entenderse en un nivel de generalidad suficiente para la recuperación, integración y transferencia. Además, la abstracción genérica da generalidad a las inferencias hechas a partir de los modelos específicos que se construyen. Como señaló Berkeley, uno no puede imaginar un triángulo en general, pero sólo algún caso específico. Sin embargo, al considerar lo que tiene en común con todos los triángulos, somos capaces de ver el triángulo específico como falta de especificidad en las longitudes de los lados y grados de los ángulos.

La misma representación concreta puede interpretarse y entenderse como genérica o específica en función de las exigencias del contexto de razonamiento. Los investigadores son capaces de entender qué inferencias hechas del comportamiento de una construcción se aplican a los vasos sanguíneos in vivo y qué se aplican al modelo específico de construcción in vitro. En el experimento dentro del sistema de construcción vascular descrito en la Figura 1, es posible identificar inferencias que son específicas del bucle de flujo y construir modelos e inferencias hechas a partir de ellos, que se aplican a los sistemas vasculares in vivo, generalmente. Uno es el siguiente. La hipótesis del experimento es que el acondicionamiento de las construcciones sometiéndolas primero a los tipos de fuerzas experimentadas in vivo evitará la formación de plaquetas (reduciendo así el riesgo de trombosis). Las inferencias sobre las respuestas de las células endoteliales que recubren la construcción a las fuerzas ejercidas sobre ellas por el fluido que fluye en el bucle de flujo son genéricas para los miembros de una clase de sistemas cardiovasculares (a una aproximación de primer orden). Pero las inferencias sobre la fuerza de la construcción basada en el andamio de colágeno son específicas de ese modelo. Otro ejemplo proviene de la estructura física de la red de neuronas chapadas en cada Plato. El proceso actual para enchapar las neuronas en el MEA llama para romper las conexiones entre las neuronas, y colocar las células flotantes en una sola capa en la parte inferior del Plato. A continuación, se deja que las celdas vuelvan a crecer las conexiones entre sí. Claramente, la estructura de la red resultante no tiene ninguna relación específica con la corteza original. En efecto, el plato es una instancia específica de una red de neuronas que puede ser utilizada por los investigadores como y razonada con como una red genérica. Al enmarcar el Plato de esta manera, permite a los investigadores inferir las características de procesamiento de la red de una red específica y transferir sus hallazgos a otras redes corticales.

En resumen, los tipos de procesos de abstracción que hemos estado considerando proporcionan formas de representar y razonar selectivamente con modelos. La idealización, la limitación de mayúsculas y minúsculas, la aproximación y la abstracción genérica proporcionan un medio para representar e integrar restricciones derivadas de diferentes fuentes en modelos. Razonar correctamente a través de los modelos requiere reconocer qué características son germinales y cuáles son cognitivamente inertes, dentro de ese contexto de resolución de problemas. Este punto requiere la consideración de cómo los modelos in vitro representan fenómenos in vivo.

4.3.-Paralelismo y ejemplificación

Los modelos in vitro son mundos virtuales que los bio-ingenieros diseñan y construyen para "considerarlos paralelo", o "imitar", o "aproximado", o "simular" los fenómenos in vivo. En algunos casos, al igual que con las fuerzas mecánicas en el vaso sanguíneo y la morfología y alineación de las células endoteliales, los fenómenos son bien entendidos. En otros casos, los modelos son los únicos medios que tienen a partir de los cuales determinar la naturaleza de los fenómenos in vivo. Son hipótesis basadas en una comprensión completa, como el plato como modelo de aprendizaje, y el objetivo es desarrollar la comprensión del cerebro o las células endoteliales del mundo paralelo del sistema-modelo. El físico y el cálculo de modelos se diseñan y crean con la intención de realizar simulaciones con ellos. Los sistemas-modelo son sitios de experimentación sistemática y la naturaleza del paralelismo entre los fenómenos in vivo y sus correspondientes sistemas modelo está evolucionando continuamente, aunque sólo sea de manera menor, a medida que se vuelven mejores o diferentes, tipos de aproximaciones. Por lo tanto, el paralelismo es un proceso histórico, tanto por la agenda general de rediseño como por el hecho de que los sistemas-modelo no son configuraciones de rápido alcance, sino sitios minuciosamente construidos de seria inversión en períodos de tiempo considerables.

¿Cuál es la naturaleza del paralelismo o mimetismo, es decir, de las relaciones entre los modelos y lo que representan, especialmente en relación con su condición de artefactos epistémicos? El objetivo en la creación de estos mundos virtuales es que los modelos sean del mismo tipo que los fenómenos del mundo real a lo largo de dimensiones particulares, tales como procesos de primer orden de flujo sanguíneo en las arterias o tipo de procesamiento de información en el cerebro. En tales aspectos, las relaciones referenciales se construyen en el diseño y la construcción de los modelos. Varios relatos de modelos proponen que la "similitud" es la base de la relación de representación. Los modelos son similares y diferentes de lo que modelan a lo largo de aspectos relevantes [Cartwright, 1983; Giere, 1988; Nersessian, 1992; 2002]. En el límite, los modelos son isomórficos a los aspectos relevantes de los fenómenos que modelan; de hecho, si tienen éxito con el modelo de pared vascular diseñado por tejido será idéntico a una arteria en estructura, comportamiento y función, es decir, en sí misma una arteria. Sin embargo, al considerar cómo representan, la palabra pertinente aquí es "relevante". No cualquier similitud y diferencia importa. Para los sistemas-modelo, los aspectos relevantes son los que ejemplifican los fenómenos que se están investigando. Como introdujo Nelson Goodman en Lenguajes del arte [Goodman, 1968], una nueva presentación ejemplifica ciertas características o propiedades si "ambos son y se refieren a" algo que tiene esas características o propiedades; que es "la ejemplificación es posesión más referencia [p. 53]. Uno de sus ejemplos es el de la muestra de tela de un sastre, que "es una muestra de tejido de color, textura y patrón; pero no de tamaño, forma o peso o valor absoluto" [ib.]. En nuestros casos, la noción de ejemplificación captura la idea de que un modelo debe ser del mismo tipo a lo largo de aspectos relevantes. Los aspectos relevantes son aquellos que ejemplifican los objetos, entidades o procesos bajo investigación. Por ejemplo, el hybrot no sólo es un sistema de modelos utilizado para representar el procesamiento neuronal in vitro, sino que también es un sistema que, en realidad, está haciendo el procesamiento neuronal. Ambos se refieren al procesamiento seleccionado en un cerebro y está procesando en un cerebro, simultáneamente, en el contexto de la investigación en el laboratorio D.

Catherine Elgin [1996; 2004] se ha basado en la noción de Goodman para abordar el problema epistémico de que la ciencia hace un uso extensivo de prácticas que, si insistimos en equiparar la verdad y la aceptabilidad epistémica, conducen claramente a falsedades, como limitar casos demostraciones, idealizaciones, suavizado de curvas y modelado computacional. Sin embargo, la ciencia acepta los resultados de prácticas tales como el avance de objetivos científicos, por ejemplo, derivar una representación matemática o predecir futuros estados del mundo real sobre la base de una simulación computacional. Podemos concluir de esto ya sea que la ciencia es cognitivamente defectuosa o permitir que la ciencia de pie "a menudo se expresa y se transmite por símbolos que no son y no pretenden ser verdad" [Elgin, 2004,p. 116]. Ella aboga por que el valor epistémico del modelado, así como otras estrategias y símbolos (propositivas e icónicas) utilizados por los científicos, radica en su capacidad para ejemplificar es decir, " a la vez referirse y crear instancias de una característica" [Elgin, 1996,p. 171]. Por lo tanto, los modelos ofrecen al investigador acceso epistémico a características seleccionadas de los fenómenos. Como ejemplos, los modelos se diseñan para centrar la atención en características relevantes para los objetivos epistémicos. Como señala Elgin, las ejemplificaciones físicas se crean rutinariamente con fines experimentales, como cuando se refina un trozo de mineral para que consista únicamente de hierro. La abstracción física, entonces, ofrece acceso epistémico a las propiedades del hierro en el contexto de la experimentación en el mundo real.

Los bio-ingenieros que hemos estado estudiando diseñan y crean ejemplificaciones híbridas paralelas a los fenómenos in vivo que desean estudiar, al grado de especificidad que creen suficiente o en la medida en que el desconocimiento de los fenómenos o la naturaleza de los materiales de diseño los restringe. Los modelos abstraen características irrelevantes (o potencialmente relevantes), centrando así la atención en aquellas características que contribuyen al contexto de resolución de problemas. Entender qué inferencias se pueden hacer en general sobre el comportamiento de las células endoteliales en la arteria o neuronas en el cerebro, sobre la base de una simulación a través de un sistema modelo deriva, no de hacer generalizaciones inductivas, sino a través de la comprensión de cómo el un modelo ejemplifica las características seleccionadas de todos estos fenómenos. Un sistema de modelos correctamente diseñado garantiza a los investigadores el alcance de los resultados experimentales del mundo in vitro, en lugar de poder llevarlos a cabo en el mundo in vivo.

Por último, aprovechar la noción de ejemplificación para explicar cómo los modelos construidos son representaciones selectivas, sirve como un recordatorio de la naturaleza profundamente sociocultural de la representación. Como observó Goodman, lo que un modelo ejemplifica depende de los objetivos, los propósitos y el contexto. El chip de pintura generalmente ejemplifica un color, pero en ciertas circunstancias se puede tomar para ejemplificar una forma geométrica, como un rectángulo. Ejemplifica el color dentro de un conjunto particular de normas sociales que rodean la práctica de recoger pintura para las paredes o la casa. En sus prácticas de razonamiento basadas en modelos, los investigadores del Laboratorio A y el Laboratorio D se basan en un repertorio de prácticas de representación y las convenciones de comunidades específicas que las rodean.

5.- CONCLUSIONES

Hemos discutido la naturaleza del razonamiento basado en modelos llevado a cabo mediante la construcción y manipulación de modelos de simulación física en el contexto interdisciplinario de la ingeniería biomédica. En los procesos de razonamiento, los modelos tienen dos caras: mental y física. Es decir, la inferencia implica la co-construcción y manipulación de modelos físicos y mentales. Los modelos físicos son diseños híbridos que combinan restricciones biológicas, de ingeniería y representan entendimientos selectivos. Los modelos mentales, también, entrelazan conceptos y entendimientos biológicos y de ingeniería. La resolución de problemas a través de la simulación con sistemas de modelos es una actividad epistémica que permite la inferencia mediante la creación selectiva de objetos, situaciones, eventos y procesos que ejemplifican los de interés de manera selectiva. También es una actividad sociocultural en el sentido de que, incluso al considerar las actividades de razonamiento, los modelos y las prácticas de uso de los mismos, son logros cognitivos y culturales. Por lo tanto, aunque los sistemas-modelo representados en las figuras 1 y 2 transmiten sólo una representación decantada, los sistemas de modelos y experimentos deben entenderse como incrustados en ricos sistemas culturales cognitivos, distribuidos en el espacio y el tiempo, habilitar y apoyar dicha experimentación. La experimentación y la inferencia están condicionadas a un tejido de modelos de bloqueo entrelazado, en todo el espacio, el tiempo, las personas y los artefactos, conectando representaciones. Nuestro Meta-análisis ha separado algunos de los hilos, pero en la práctica son intrincadamente tejidos e inseparables.

Los dispositivos y los sistemas de modelos son lo que los estudios socioculturales de la ciencia se refieren como la "cultura material" de la comunidad, pero ellos también funcionan como lo que los estudios cognitivos de la ciencia se refieren como "artefactos cognitivos", que participan en el razonamiento, procesos representativos y de resolución de problemas de un sistema distribuido. Nuestro punto es que dentro de la investigación de los laboratorios, ambos son, y no es posible entender cómo producen afirmaciones de conocimiento centrándose exclusivamente en uno u otro aspecto. Son representaciones de los entendimientos actuales y, por lo tanto, desempeñan un papel en el razonamiento basado en modelos; son fundamentales para las prácticas sociales relacionadas con la membresía comunitaria; son sitios de aprendizaje; proporcionan vínculos que unen a una generación de investigadores (alrededor de cinco años) a otra; funcionan como " Trinquetes " culturales que permiten a una generación aprovechar los resultados de la anterior, y así hacer avanzar la resolución de problemas. En resumen, son centros que entrelazan las diversas dimensiones del tejido cognitivo-cultural en el que se lleva a cabo la resolución de problemas en estos laboratorios interdisciplinarios de investigación de ingeniería.

CAPITULO VI

MODELO DE ESCALA EN INGENIERIA: CASO DE FROUDE

Por Sjoerd D. Zwart

1 INTRODUCCION

Los ingenieros han empleado prácticas de escalado desde tiempos inmemoriales, mucho antes de que se introdujeran métodos de escalado basados en números sin dimensiones. Al construir edificios sagrados, palacios, buques y la maquinaria de la guerra en tamaños cada vez mayores, los ingenieros se vieron obligados a descubrir cómo escalar o reducir de forma fiable, los artefactos hacia arriba o hacia abajo. Un fundamento teórico obvio de estas prácticas de escalado fue la teoría euclidiana de figuras y sólidos similares contenidos en el Libro VI de los Elementos. Sin embargo, los ingenieros pronto descubrieron que la geometría euclidiana era insuficiente cuando se trataba de escalar artefactos de forma fiable, ya que no considera las fuerzas. Si un barco se escala diez veces en las tres dimensiones euclidianas, entonces el artefacto resultante será demasiado débil para fines prácticos. Galileo fue el primero en desarrollar una teoría sobre la escala de las fuerzas y en el siglo XIX, fue William Froude quien desarrolló una teoría sobre el modelado a escala. En consecuencia, como el análisis dimensional teórico no se desarrolló hasta principios del siglo XX, es demasiado sencillo equiparar el modelado a escala con el análisis dimensional.

En este capítulo se abordan cuestiones sobre los fundamentos del modelado a escalas y los problemas filosóficos relacionados. Permítanme explicar por qué no se puede considerar que estas cuestiones se hayan resuelto todavía. En la época de Froude, la teoría del modelado a escala era conocida, en buena tradición euclidiana, como la teoría de la similitud o similitud. Dado que Froude es el padre fundador de la escala "científica", sus esfuerzos pueden constituir un buen lugar para iniciar nuestra búsqueda de la base científica de la modelización a escala. Tradicionalmente, esta base se toma como análisis dimensional, pero en ninguna parte de sus escritos, Froude menciona o lleva a cabo ningún análisis de dimensiones. Así que en nuestra búsqueda de los orígenes del modelado a escala debemos profundizar y abordar las siguientes preguntas: ¿Cuál es la base del método de escalado de Froude si no usó números sin dimensiones? ¿Cuál es el estado de las leyes modelo? ¿Tienen contenido empírico o son analíticos? Y, por último, como los modelos a escala a menudo se distinguen como diferentes de otros modelos, discutiremos la cuestión de si este estatus especial se aplica también a los modelos a escala de Froude.

Mi objetivo al responder a estas preguntas es, en primer lugar, arrojar luz sobre los fundamentos filosóficos de la escala en la ingeniería sin referencia al análisis dimensional. Además, los resultados también podrían tener consecuencias para la investigación de los fundamentos de las metodologías de escalado en las ciencias de la ingeniería moderna, que de hecho, se basan sin duda en el análisis dimensional. Las metodologías de escalado muestran un aspecto importante del conocimiento de la ingeniería, ya que muestran cómo los ingenieros pueden eludir problemas teóricos intratables y realizar su trabajo aplicando conocimientos prácticos de ingeniería. Por lo tanto, en última instancia, las respuestas a estas preguntas servirán para demostrar que la filosofía de las ciencias de la ingeniería es un campo de investigación interesante por sí mismo.

Para responder a las preguntas centrales sobre los fundamentos filosóficos del modelado de escalas, también necesitamos discutir partes de su historia y práctica; lo haremos profundizando en un ejemplo específico: el modelado a escala en la arquitectura naval. El esquema de este capítulo es el siguiente. En primer lugar, discutiremos la historia del modelado a escala, en general, y de la modelización a escala en la arquitectura naval en particular. A continuación, echaremos un vistazo a fondo a la forma en que los modelos a escala se utilizan hoy en día en la arquitectura naval y explicaremos la teoría y la práctica del método de extrapolación de Froude aplicado a los modelos en los laboratorios de tanques de remolque. Equipado con este conocimiento práctico de laboratorio, finalmente nos dirigiremos a preguntas más filosóficas. Primero consideraremos el origen y la fiabilidad de los conocimientos producidos por los modelos a escala y luego nos dirigiremos a las preguntas sobre los fundamentos de los conocimientos producidos. En ese momento consideraremos el carácter especial de los modelos a escala y el papel y el carácter de las leyes de similitud. Resulta que es la suposición empírica de que una propiedad física es una escala de relación medible que garantiza la aplicación de metodologías de escalado y la superposición de las cantidades físicas implicadas. Cerraremos con un resumen de las conclusiones y predicciones para futuras investigaciones.

2.- ALGUNOS DESTACADOS EN LA HISTORIA DEL ESCALADO

2.1 Mecánicos

El escalado de dispositivos mecánicos hacia arriba y hacia abajo ha sido parte integral de la vida diaria de la ingeniería desde tiempos inmemoriales. En conjunción con la guerra, el comercio y el aumento de la riqueza, los constructores debían construir y diseñar artefactos cada vez más grandes. El sentido común indica a uno que aumentar o disminuir las dimensiones de un dispositivo mecánico en consecuencia aumentará o disminuirá sus capacidades. Sin embargo, simplemente escalar geométricamente un artefacto de trabajo no siempre conduce al resultado deseado; una forma de proceder, en tal situación, es variando sistemáticamente las diferentes partes de la máquina prevista y tratando de llegar a un resultado que sea lo más eficiente posible.

Por un primer ejemplo histórico de escalado de ingeniería, recurramos a los mecánicos de Alejandría, como se les llamaba, que sistematizaron construcción de catapultas griegas. Philo de Bizancio (280-220 a. C.), también conocido como Philo Mechanicus, y Héroe de Alejandría (10-70 d.C.) bien conocido por su ingenio experimental, ambos escribieron su propia Belopoeica, o tratado sobre artillería. Según Cohen y Drabkin [1948, p.318] estos tratados son interesantes debido a la forma en que aplican 'fórmulas matemáticas empíricas a los problemas de la balística'.

En su Belopoeica 3, Philo escribe (citado de [Cohen y Drabkin, 1948, p.318– 319]):

> “Ahora algunos de los antiguos descubrieron que el diámetro del agujero [recibir las madejas] era el elemento básico, principio y medición en la

> construcción de artillería. Pero era necesario determinar este diámetro no accidental o azarosamente, sino por algún método definido por el cual también se pudiera determinar la medida proporcionada para todas las magnitudes del instrumento. Pero esto no se podía hacer excepto aumentando o disminuyendo el diámetro del agujero y probando el resultado. Y los antiguos no lograron determinar esta magnitud por prueba, porque sus ensayos se llevaron a cabo [...] simplemente en relación con el rendimiento requerido. Pero los ingenieros que vinieron más tarde, [...] redujeron el principio de construcción a un solo elemento básico, viz., el diámetro del círculo que recibe las madejas retorcidas. [Philo añade también la razón del enfoque heurístico para las máquinas de diseño de guerra] Porque no es posible llegar a una solución completa de los problemas involucrados simplemente por la razón y por los métodos de la mecánica; muchos descubrimientos pueden, de hecho, hacerse sólo como resultado de un juicio."

Hacker, reflexionando sobre este pasaje, describe la forma en que los ingenieros escalaron sus diversas máquinas de guerra y se da cuenta de cómo los diseñadores clásicos compartieron sus conocimientos experimentales con aquellos que lo necesitarían para la construcción de máquinas de guerra para el campo de batalla, [1968, p.49]. Por ejemplo, en el caso de las catapultas, el peso de las piedras determinó el diámetro del agujero que sujeta las madejas por medio de la siguiente fórmula d = $\frac{11\sqrt[3]{100m}}{10}$ donde d se mide en dígitos (1 digito ≈ 1,9 cm) y m se mide en minas (1 mina ≈ 1 libra). Todas las demás partes de la catapulta se midieron de acuerdo con el tamaño del diámetro del agujero de la madeja. Pero también cuando las flechas fueron disparadas, su tamaño determinó el diámetro del agujero de la madeja, que era un noveno de la longitud de la flecha. Los resultados computacionales fueron tabulados y fueron utilizados por los ingenieros del ejército griego para construir armas de guerra con las dimensiones deseadas, cuando estaban en guerra.

Las citas originales de Philo y las paráfrasis de Hacker muestran claramente la relevancia para los ingenieros del método de escalado sistemático para máquinas de guerra. Aparte de la necesidad de este método, las citas anteriores también ilustran el método de lo que Walter Vincenti llama variación de parámetros, [1990, p. 139]. Según Vincenti, la variación de parámetros es «el procedimiento para determinar repetidamente el rendimiento de algún material, proceso o dispositivo mientras se varían sistemáticamente los parámetros que definen el objeto de interés o sus condiciones de funcionamiento». Una vez más, la cita de Philo muestra claramente que hace veintidós mil años los ingenieros ya estaban familiarizados con la variación de parámetros e incluso consideraron necesario producir conocimientos de ingeniería confiables.

El segundo ejemplo histórico se refiere a la introducción al primer día del Diálogo de Galileo sobre dos nuevas ciencias, [1638]. Como es bien sabido, la primera nueva ciencia trata sobre "la resistencia que los cuerpos sólidos ofrecen a la fractura", y la segunda ciencia nueva es sobre el movimiento uniforme y naturalmente acelerado. Justo al principio, Galileo nos informa que su curioso amigo imaginario Sagredo, frecuenta el astillero del arsenal veneciano "por el mero placer de observar el trabajo de aquellos que, debido a su superioridad sobre otros artesanos, llamamos "hombres de primer rango". Pero Sagredo a veces desconfía de las explicaciones de los artesanos. Dice: 'Y a pesar del hecho de que lo que el anciano nos dijo hace un rato, es proverbial y comúnmente aceptado, sin embargo, me pareció totalmente falso'. Galileo a través de Salviato, responde:

> SALV: "Usted se refiere, tal vez, a esa última observación suya cuando preguntamos la razón por la que emplearon existencias, andamios y refuerzos de dimensiones más grandes para lanzar una embarcación grande que para una pequeña; y él respondió que lo hicieron con el fin de evitar el peligro de que el barco se separa bajo su propio peso pesado, un peligro al que no están sujetos los barcos pequeños?"

Sagredo está de acuerdo y sostiene que esta "opinión actual" en la práctica de la ingeniería debe ser errónea, ya que no sigue la geometría euclidiana al discutir de máquinas pequeñas a grandes. Explica:

> SAGR: "Ahora, ya que la mecánica tiene su base en geometría, donde el mero tamaño no corta ninguna figura [no tiene importancia], no veo que las propiedades de círculos, triángulos, cilindros, conos y otras figuras sólidas cambien con su tamaño. Si, por lo tanto, una máquina grande se construye de tal manera que sus partes se llevan unas a otras la misma relación que en una más pequeña, y si la más pequeña es lo suficientemente fuerte para el propósito para el que fue diseñada, no veo por qué el más grande también no debe ser capaz de marchitarse y cualquier prueba severa y destructiva a la que pueda ser sometida. "

En las páginas que siguen a Salviato, explica por qué este argumento de la geometría falla en el contexto de los artefactos mecánicos, dando lugar a las palabras a menudo citadas, dadas en la página 130 en la traducción de Drake:

> SALV: Por lo que ya se ha demostrado, se puede ver claramente la imposibilidad de aumentar el tamaño de las estructuras a grandes dimensiones, ya sea en el arte o en la naturaleza; del mismo modo, la imposibilidad de construir barcos, palacios o templos de tamaño enorme de tal manera que sus remos, yardas, vigas, pernos de hierro y, en resumen, todas sus otras partes se mantengan unidas; ni la naturaleza puede producir árboles de tamaño extraordinario porque las ramas se descompondrían bajo su propio peso; así también sería imposible construir las estructuras óseas de hombres, caballos u otros animales para mantenerse unidos y realizar sus funciones normales si estos animales se incrementaran enormemente en altura; para este aumento de altura sólo se puede lograr empleando un material que es más duro y más fuerte de lo habitual, o ampliando el tamaño de los huesos, cambiando así su forma hasta que la forma y apariencia de los animales sugieran una monstruosidad.

Aquí es donde comienza el fundamento teórico de lo que los ingenieros habían conocido durante mucho tiempo, a saber, que el escalado geométrico es insuficiente como heurístico para aumentar o disminuir los artefactos mecánicos. Los constructores navales y arquitectos deben haber sabido durante al menos dos mil años, que el escalado geométrico de los dispositivos existentes no conduce a nuevos artefactos confiables.

Como los ejemplos dados hasta ahora provienen de la historia, puede surgir rápidamente la impresión de que el uso de modelos a escala por parte de los ingenieros es principalmente cosa del pasado, especialmente si se tienen en cuenta los medios computacionales modernos. Sin embargo, nada podría estar más lejos de la verdad. Sólo para resaltar un ejemplo, considere la investigación de hoy sobre la resistencia sísmica de estructuras de edificios complicados. Los investigadores sísmicos colocan modelos a escala reducida en mesas de agitación sísmica de alta tecnología para averiguar cómo las estructuras diseñadas hacen frente a las circunstancias de movimiento de tierra de los terremotos (véase, por ejemplo, [Towhata et al., 2004]). La nueva sede de China Central Televisión (CCTV y TVCC), un diseño de Rem Koolhaas y Ole Scheeren (OMA), ofrece un ejemplo interesante. Para confirmar el rendimiento sísmico de esta estructura ultramoderna, se colocó un modelo de cobre de 64 toneladas encima de una mesa de agitación y todo un equipo de ingenieros sísmicos y estructurales registró sus rendimientos sísmicos. Por lo tanto, las tablas de agitación se encuentran en todo el mundo.

Podemos concluir con seguridad que las metodologías de escalado se han utilizado desde el comienzo de la historia registrada y todavía están en uso hoy en día; y si habrá una era en la que el modelado por computadora hace que todo el modelado físico sea obsoleto, entonces esa era aún no ha comenzado. Ahora que hemos visto algunos ejemplos de escalado mecánico nos permiten, a modo de introducción al método de escalado de Froude, considerar algunos aspectos destacados en la historia de la dinámica de fluidos.

2.2 Dinámica de fluidos

Comencemos nuestra cuenta de los aspectos más destacados en la historia de la dinámica de fluidos introduciendo alguna terminología. La mecánica de fluidos es la rama clásica de la mecánica continua que estudia la relación entre fuerzas y movimientos en fluidos, que pueden ser líquidos o gases. El estudio del fluido móvil se conoce como dinámica de fluidos, que se divide en aerodinámica e hidrodinámica dependiendo de si la relación es con gases o fluidos. Tradicionalmente, el término hidráulica está reservado para conocimientos de ingeniería más prácticos vinculados al flujo de tuberías, bombas, turbinas, diseño de presas, ríos, comportamiento de canal, protección costera y erosión, etc. El término proviene del griego hydraulos que significa órgano de agua. La hidrodinámica se considera generalmente para proporcionar los antecedentes teóricos a la hidráulica. Primero echemos un vistazo a algunos ejemplos históricos en hidráulica, antes de recurrir a algunos aspectos destacados de la historia de la hidrodinámica.

2.2.1.- Hidráulica experimental

Experimentar con recipientes a escala reducida tiene una larga historia, que no siempre está estrechamente relacionada con la teoría de la hidrodinámica. Fue quizás la misma curiosidad que hizo sospechar a Sagredo sobre la explicación dada por los artesanos en el astillero veneciano que dejó a Benjamín Franklin (1706-1790) insatisfecho con la explicación del barquero sobre el lento avance de una cacería de pista en Holanda, [Franklin, 1769]. Los navegantes explicaron que la profundidad reducida del canal, y por lo tanto un aumento en la resistencia fue la causa del tiempo de viaje prolongado. En una carta, fechada el 10 de mayo de 1768, Franklin informó a John Pringle sobre su precursor de experimentos modernos con tanques de remolque. Franklin tenía una vaguada, que tenía catorce pies de largo, seis pulgadas de profundidad y ancho, y un barco modelo de seis pulgadas de largo, dos pulgadas y cuarto de ancho y uno y cuarto de pulgada de profundidad. El barco fue arrastrado por el peso de un chelín conectado al barco por un hilo de seda que pasó sobre una polea de latón en el extremo del chelín. Como Franklin no tenía un reloj a su disposición, contó lo más rápido que pudo para medir la duración del viaje de la modelo. Repitió ocho experimentos tres veces, una serie con el agua de una pulgada y media de profundidad, una serie en una profundidad de dos pulgadas, y una serie donde el agua era de cuatro pulgadas y media de profundidad. El tabuló los datos, lo que mostró que en una profundidad de una pulgada y media de agua, el barco tomó, en promedio, ciento una marcas, en una profundidad de dos pulgadas tomó ochenta y nueve marcas y en cuatro pulgadas y media tomó sólo setenta y nueve marcas para pasar a través de la vaguada. Así, Franklin demostró que los barcos experimentan más resistencia en aguas poco profundas que en aguas profundas.

Unas décadas más tarde, Charles Bossut (1730-1814), D'Alembert y el Marqués de Condorcet llegaron a la misma conclusión. En 1775, el gobierno francés ordenó averiguar sobre la resistencia que los cuerpos encuentran en el agua en movimiento. Con este fin, construyeron un tanque de remolque de unos cien pies de largo, cincuenta pies de ancho y siete pies de profundidad. También llegaron a la conclusión de que el factor de fricción de la piel era insignificante en comparación con el de la inercia de un barco. Además, consideraron que la fricción a lo largo de los lados y la parte inferior del barco era muy pequeña y no separable de la resistencia del aire. A finales del siglo XVIII (1796-1798), el coronel Mark Beaufoy (1764-1827) llevó a cabo pruebas de remolque que dieron resultados más fiables. Estos resultados fueron registrados en sus Experimentos Náuticos e Hidráulicos, [1834]. Además de hacer pruebas con respecto a la longitud y la superficie, Beaufoy también llevó a cabo pruebas para averiguar cuáles fueron los efectos específicos de las formas frontal y trasera. Descubrió que la fricción experimentada no aumentó con el cuadrado del aumento de la velocidad, sino con la potencia igual a un número entre 1,71 y 1,81.

El más importante período en la historia de los experimentos con tanques de remolque y la teoría subyacente es la segunda mitad del siglo XIX. En ese momento, William Froude (1810-1879) llevó a cabo sus conocidos experimentos, utilizando modelos a escala como el Cuervo y el Cisne, y más tarde el H.M.S Greyhound, para desarrollar una metodología para predecir la resistencia de los buques de navegación marítima. En 1852, Ferdinand Reech (1805-1884) formuló lo que ahora se conoce como la ley modelo de Froude, [1852]. «Sólo uno tendría que construir uno u otro modelo con dimensiones lineales l veces tan grandes y multiplicar todas las velocidades observadas por la cantidad u $=\sqrt{l}$ para que el nuevo sistema funcione de manera similar a la anterior, dando lugar a fuerzas, de las cuales todas las intensidades estáticas se incrementarían en proporción al cubo de la relación de las dimensiones lineales', [Rouse and Ince, 1957, p.155]. Froude formuló así la 'ley de semejanza' así: «el diagrama ... expresará igualmente la resistencia de un barco similar a él, pero de (n) veces la dimensión, a varias velocidades sucesivas, si en la aplicación del diagrama al caso de la nave interpretamos todas las velocidades como $\sqrt{n}$ veces, y las resistencias correspondientes como n^3 veces tan grande como el diagrama', [Froude, 1868]. O, como una ecuación en la que L, V, D son longitud, velocidad y arrastre y m se refiere al modelo y p al prototipo

$$(L_p = nL_m \wedge V_p = \sqrt{n}V_m) \rightarrow D_p = n^3 D_m \quad (1)$$

En el Apéndice de su correspondencia con El Almirantazgo [1868], Froude explica cómo llegó a su ley modelo. Sin embargo, según T. Wright, probablemente nunca rastrearemos la cadena original de razonamiento que llevó a Froude a su resultado final, [Wright, 1992, p.244]. Froude parece haberse inspirado en la idea de que si el modelo y el prototipo navegan con "velocidades correspondientes", entonces los patrones de onda alrededor del modelo y el prototipo tendrán formas similares. En consecuencia, a medida que el aumento del volumen procede según el cubo de la dimensión de longitud, el trabajo que se debe hacer para crear y desplazar las ondas también procede por el cubo.

En la correspondencia referida, Froude formuló su afirmación directamente, sin mencionar el impacto de la viscosidad del agua. Tan pronto como Froude tenía el tanque de remolque Torquay a su disposición, inmediatamente comenzó a investigar cómo la velocidad, la superficie y la configuración de los tablones sumergidos influyeron en su resistencia en el agua. Dos años después de que Froude publicara los resultados de sus experimentos sobre fricción superficial causada por aviones, [1872], cambió la aplicación de su 'ley de comparación'. Distinguió entre la resistencia y la resistencia de la formulación de ondas debido a otras causas de las cuales la fricción de la piel era la más importante, y restringió su "ley de comparación" al aspecto de la resistencia de la formulación de ondas. Este método de extrapolar los datos del modelo a escala al prototipo todavía se utiliza hoy en día cuando se llevan a cabo experimentos de tanques de remolque para predecir la resistencia de los buques de nuevo diseño.

Como Rouse e Ince observan sucintamente, la historia no siempre sigue un curso racional. F. Reech fue el primero en formular la ley de similitud de Froude, y en ninguna parte de los escritos de Froude se puede encontrar el número dimensional que lleva su nombre. Además, aparte de los arquitectos navales casi nadie se le llegaría al nombre de Froude si se le preguntara sobre el método de extrapolación utilizado en los experimentos actuales de tanques de remolque para predecir la resistencia de los nuevos cascos de buques [Rouse e Ince, 1957, p. 187].

2.2.2.- Hidrodinámica

Al menos hasta principios del siglo XX, la hidráulica experimental y la hidrodinámica teórica progresaron en un relativo aislamiento mutuo. Este relativo aislamiento se ilustra muy bien por la ausencia, por ejemplo, del término 'Froude' en el esbozo histórico de Neményi de los principales conceptos e ideas detrás de la dinámica de fluidos, [1975]. Rouse e Ince atribuyen la falta de colaboración entre ambos campos a la ausencia de un objetivo común o un problema común.

El propósito de considerar el trasfondo teórico de la hidráulica es dar un contexto histórico para la ley de arrastre de Newton, el teorema de Bernoulli y las ecuaciones Navier-Stokes, a las que se hará referencia en las siguientes secciones. Además, muestra cómo el trabajo práctico de ingeniería como el de Froude (y también, como veremos, de Reynolds), aunque llevado a cabo sin ningún vínculo con la teoría subyacente, finalmente llegó a ser cubierto por esa teoría, a saber, en la forma de las Ecuaciones Navier- Stokes.

Aunque el número de manuales sobre la historia de la dinámica de fluidos no es abrumadoramente grande, los contornos de esta historia están lo suficientemente bien documentados. Para nuestros propósitos, sólo tenemos que insinuar algunos de sus aspectos más destacados. Dos de ellos se encuentran en el Principia de Newton, [1687], Libro II, que trata sobre el movimiento circular de fluidos. Newton quería probar que Descartes se equivocó al asumir que todo el espacio estaba lleno de materia y que además estaba equivocado acerca de los planetas que se mueven a través del "espacio lleno" sin fricción. Por lo tanto, se embarcó en sus investigaciones sobre la resistencia a los fluidos.

El primer punto culminante se acepta generalmente como el comienzo que involucra las dos primeras proposiciones, de la Sección VII, que trata sobre 'el movimiento de fluidos, y la resistencia hecha a los cuerpos proyectados'. Las dos proposiciones consideran la similitud cinemática y dinámica entre dos sistemas con el mismo número respectivo de partículas. La Proposición 32, la primera, aborda la cuestión cinemática de movimientos similares en sistemas con el mismo número de partículas. Primero, Newton asume que los dos sistemas son similares en términos de geometría, densidad y movimiento, y que, en términos modernos, sus colisiones son elásticas. Newton afirma entonces 'que las partículas de esos sistemas continuarán moviéndose entre sí con movimientos similares y en tiempos proporcionales'. En el texto que acompaña a la propuesta, Newton explica la propuesta sobre la base de los conceptos de «partes similares y proporcionales de figuras similares». La explicación sistemática de esta similitud cinemática será el tema de la sección 3.3. La segunda propuesta de Newton que consideraremos, aborda la cuestión dinámica de los movimientos similares en los sistemas de cuerpos que acabamos de mencionar. Newton escribe:

> Proposición 33, teorema 27
>
> Las mismas cosas que se suponen, digo, que las partes mayores de los sistemas se resisten en una proporción compuesta de la proporción cuadrada de sus velocidades, y la relación cuadrada de sus diámetros, y la simple relación de la densidad de las partes de los sistemas.

Esta cita resulta que describe exactamente el factor de escala de fuerza (9) utilizado en las explicaciones sistemáticas modernas de las metodologías de escalado. Esa es la razón por la cual la ecuación (10) a veces se llama la ley modelo de Newton. Además, Newton deriva un segundo corolario de la Proposición 33, donde ya observa que el arrastre de un objeto inmerso en un fluido varía directamente como el cuadrado de su velocidad. Dice: '... en el mismo fluido un cuerpo proyectado que se mueve rápidamente se encuentra con una resistencia que es como el cuadrado de su velocidad, casi.

El segundo punto culminante de la historia de la dinámica de fluidos que quiero mencionar se refiere a la forma en que Newton se ocupa de la viscosidad de los fluidos. Justo al comienzo de la sección ix, en la hipótesis, Newton formula su conceptualización de fluidos como medios continuos. Es la primera formulación adecuada de la propiedad fundamental de los flujos paralelos viscosos que se encuentran en la literatura, a saber, que la tensión de cizallamiento es proporcional al gradiente de velocidad. La hipótesis de Newton dice: «La resistencia derivada de la falta de lubricidad en las partes de un fluido es, siendo otras cosas iguales, proporcional a la velocidad con la que las partes del fluido están separadas unas de otras'. La teoría actual sobre la fricción interna de fluidos se basa en esta descripción, o más bien en la correcta generalización de Stokes. Sin embargo, no se puede confiar en toda la hidrodinámica de Newton. Se podría decir que lo contrario está más cerca de la verdad. A pesar del prestigio, muchas de las afirmaciones de Newton sobre fluidos no se mantienen, como, por ejemplo, el teorema 39, que sigue a raíz de la hipótesis que acaba de citar [Truesdell, 1953].

Las hipótesis de Newton toman un lugar prominente en la historia de la dinámica de fluidos, ya que forman la base de lo que ahora se conoce como la distinción entre fluidos newtonianos y no newtonianos. Intuitivamente, un fluido es newtoniano si continúa exhibiendo sus "propiedades fluidas" por muy duro que se agita y si, por ejemplo, no muestra "agujeros". Más formalmente, un fluido es newtoniano si en cada punto la tensión es linealmente proporcional a la velocidad de tensión donde la tensión equivale a fuerza aplicada por área y la tasa de deformación es la velocidad a la que tiene lugar la deformación. Con un fluido newtoniano, la viscosidad es la relación de su tensión de cizallamiento y tasa de tensión. Un fluido es más viscoso que otro si en el caso de tensión de cizallamiento aplicada, la tasa de deformación es menor que con el otro fluido. El agua y el aceite como la mayoría de los otros líquidos comunes son newtonianos, al igual que todos los gases.

Por último, es interesante observar que Newton también introdujo el principio de reciprocidad, que se aplica a muchas situaciones de escala modernas. El principio se menciona al comienzo de la Proposición 34 o prueba del teorema 28. Se lee...

> “ya que la acción del medio sobre el cuerpo es la misma... si el cuerpo se mueve en un medio de reposo, o si las partículas del medio Inciden con la misma velocidad sobre el cuerpo en reposo, vamos a considerar el cuerpo como si estuviera en reposo, y ver con qué fuerza sería impulsado por el medio móvil”.

No se puede decir que Newton haya desarrollado la teoría similar utilizada en el modelado a escala contemporánea. Sin embargo, las dos primeras proposiciones mencionadas justifican la afirmación de que Newton fue la primera persona en la historia registrada en contemplar el problema de la similitud en la dinámica de fluidos.

Alrededor de medio siglo después de la publicación del Principia, Daniel Bernoulli (1700-1782) publicó su Hidrodinámica, [1738]. Vale la pena mencionar no sólo porque acuñó el término "hidrodinámica", sino también porque describió en lenguaje natural lo que más tarde se conocería como 'teorema de Bernoulli' o 'ecuación de Bernoulli'. Bernoulli basó su trabajo en el principio de la «conservación de las fuerzas vivas» al que también se refirió cuando describió la «igualdad entre el descenso real y el posible ascenso» de un fluido. Desde nuestra perspectiva, el teorema alude a la conservación de la energía, en un momento en que la energía cinética sólo se había referido en la noción de Leibniz de "fuerza viva", como producto de la masa y el cuadrado de la velocidad. El teorema de Bernoulli afirma que para todos los puntos de un fluido a lo largo de una línea en él, la suma de todas las formas de energías mecánicas permanece constante.

Diecisiete años después de Hidrodinámica, Leonard Euler (1707-1783) publicó sus Principes Géréraux du Mouvement des Fluides en los que produjo la fórmula simple hoy en día asociada con el teorema de Bernoulli:

$$P + (1/2)\rho v^2 = \text{constante} \qquad (2)$$

En esta ecuación p, ρ y v para la presión, densidad y velocidad del fluido. La Fórmula (2) es bien conocida hoy en día, ya que se enseña en cada curso de primer año de hidrodinámica. Euler derivó la ecuación (2) de sus famosas ecuaciones diferenciales para fluidos sin fricción (3). Con los flujos sin fricción, donde podemos ignorar las tensiones en el fluido, la fuerza de gravedad por unidad de volumen (g) más la fuerza de presión por unidad de volumen (p) dividida por la densidad del fluido (ρ) es igual a la aceleración total en el volumen de control.

$$\begin{aligned}
g_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} \\
g_y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} \\
g_z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}
\end{aligned} \qquad (3)$$

En esta ecuación u, v, w, son los tres componentes del campo vectorial de velocidad V (x, y, z, t) y la aceleración en el lado derecho es la derivada de este campo de velocidad dV/dt, que resulta de la aplicación de la regla de cadena. Bernoulli y Euler modelaron fluidos como en sustancias viscosas en las tensiones que no hay, son causadas por la viscosidad.

El último punto culminante en nuestra breve descripción general es, por supuesto, el desarrollo de las ecuaciones Navier-Stokes. Esto comenzó con el trabajo de Louis M.H. Navier (1785-1836) quien se acercó al movimiento de un fluido de una manera similar a Euler. Euler, sin embargo, había descartado la fricción entre las partículas de fluido más pequeñas. Navier tomó como principio el hecho de que a través de "el efecto del movimiento de un fluido las acciones repulsivas de las moléculas se incrementan o disminuyen por una cantidad proporcional a la velocidad con la que las moléculas se acercan o retroceden entre sí", [Navier, 1822]. Esta suposición llevó a Navier al elemento adicional en la ecuación de Euler, que dependía del espaciado molecular:

$$
(4) \qquad
\begin{aligned}
\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) - \varepsilon\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\\
\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} &= \rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) - \varepsilon\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)\\
\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} &= \rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) - \varepsilon\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)
\end{aligned}
$$

Dos décadas más tarde George G. Stokes (1819–1903) mostró que el número en las ecuaciones Navier representa el efecto de la fricción interna, [1845]. Las ecuaciones Navier-Stokes como (4) describen la dinámica de los fluidos newtonianos incompresibles. Para nuestros propósitos, es interesante observar que si (4) se reformula en términos sin dimensiones, muestra tanto el número Froude como el número Reynolds.

Ecuación (5) muestra la ecuación Navier-Stokes sin dimensiones solo para la dimensión x; las variables cebadas son sin dimensiones y una comparación entre ecuaciones (4) y (5) sugiere que cuando el número de Froude está relacionado con la gravedad, el número de Reynolds está relacionado con la viscosidad del fluido.

$$
(5) \qquad \frac{1}{(\mathrm{Fr})^2} - \frac{\partial p'}{\partial x'} = \left(\frac{\partial u'}{\partial t'} + u\frac{\partial u'}{\partial x'} + v\frac{\partial u'}{\partial y'} + w\frac{\partial u'}{\partial z'}\right) - \frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2}\right)
$$

Puede encontrar más información sobre la relación entre las ecuaciones (4) y (5) en [Szucs, 1980]. Es interesante concluir que las ecuaciones Navier-Stokes explican muy naturalmente los números sin dimensiones de Froude y Reynolds, a pesar de que la ecuación y los números se desarrollaron en relativo aislamiento mutuo.

3.- MODELADO A ESCALA BASADO EN LA SIMILITUD FÍSICA

Las secciones anteriores mostraron que el escalado es un aspecto importante de muchas disciplinas de ingeniería. En la presente sección, nos concentraremos en una introducción sistemática a la teoría subyacente a los modelos de escala utilizados en muchos laboratorios de tanques de remolque. Antes de entrar en detalles, primero nos concentraremos en la relación entre la investigación directa e indirecta.

3.1.- Investigación directa e indirecta

La investigación se lleva a cabo en medio de una red de diversas limitaciones y preguntas tales como: ¿Qué datos tenemos? ¿Qué sabemos del tema? ¿Cuál es el tipo de respuesta que estamos buscando? ¿Qué mejoras buscamos? Los ingenieros tienen dos formas de abordar estas dificultades. O pueden hacer investigación directa, experimentación o investigación de prototipos o pueden participar en la investigación indirecta. Este último se basa a menudo en modelos, incorporando modelos matemáticos o a escala. Incluso la investigación de prototipos es a menudo tan costosa o tan exigente que los ingenieros prefieren volver a los modelos a escala.

3.1.1.- Investigación directa

En contextos de ingeniería, la investigación directa equivale a la investigación de artefactos o procesos que se basa en experimentos a escala real. Su principal ventaja reside en la fiabilidad de los datos en comparación con la investigación indirecta. Con la investigación directa, el objeto a investigar está inmediatamente a su disposición y, a menudo, puede ser manipulado a voluntad en un entorno de laboratorio. En muchas áreas de investigación de ingeniería esta ventaja es a menudo difícil de lograr. La experimentación implica la manipulación sistemática de los valores de variables y parámetros independientes. También puede requerir muchos artefactos que no siempre están disponibles. Algunos ejemplos de tales situaciones son:

Investigar el comportamiento de nuevos diseños, o artefactos que son demasiado grandes o demasiado caros para ser reproducidos para su experimentación en grandes cantidades. Consideremos, por ejemplo, un diseño completamente nuevo de un avión, barco o cohete específico. Evidentemente, en tal caso es imposible la investigación directa sobre las características del nuevo artefacto en su conjunto. Además, si los artefactos están disponibles en los números necesarios, entonces los costos involucrados pueden llegar a ser insuperables para que la investigación directa pueda llegar a ser prácticamente imposible. Otra complicación asociada a realizar una investigación directa sobre un artefacto producido en serie se relaciona con la materia de las fichas de objetos elegidos para el experimento, que es representativo del tipo de artefacto. Si la muestra es sesgada, no podemos estar seguros de que los hallazgos también se mantendrán para los otros elementos de la serie. Un problema final de la investigación directa es que los objetos de estudio pueden ser demasiado grandes para el laboratorio utilizado para la experimentación. Eso es definitivamente algo que se mantiene cierto, casi por definición, para el rascacielos más grande del mundo.

El valor de la investigación directa reside en el hecho de que es casi la única manera de validar los resultados de la investigación indirecta. A pesar de todos los problemas asociados a la investigación directa, los resultados son generalmente más fiables que los obtenidos de la investigación indirecta.

En las raras ocasiones en que la investigación directa es posible, tiene la importante función de calibrar los resultados de la investigación indirecta. Cuando se trata de la operación o funcionamiento del artefacto en cuestión, los ingenieros suelen distinguir entre pruebas detalladas y globales, que a menudo es una forma de investigación directa. Los coches de prueba de choque o la prueba de la resistencia y elevación de aeronaves son ejemplos del último modo, mientras que ejemplos de los primeros son la comprobación de la fatiga en los clips de papel o los efectos de diferentes conjuntos de bobinados de un motor eléctrico.

3.1.2 Investigación indirecta

Cuando se utilizan objetos físicos para llevar a cabo investigaciones indirectas, dichos objetos se denominan modelos a escala. Los datos experimentales resultantes deben ampliarse o reducirse para convertirse en relevantes para el prototipo previsto. Para que los datos del modelo sean utilizables, hay que implementar leyes de modelo para describir la similitud entre el modelo y el prototipo. Los resultados de los experimentos del modelo de escala se extrapolan a la situación del prototipo previsto. Esta extrapolación se basa a menudo en consideraciones físicas en combinación con un modelo matemático. Al igual que con los modelos matemáticos, el uso de modelos de escala física también exige las simplificaciones necesarias. Por lo tanto, los resultados de los experimentos de modelo a escala también deben validarse, y eso se puede hacer mediante la realización de experimentos directos. Veremos que esto es exactamente lo que Froude hizo con sus experimentos con el H.M.S. Greyhound.

La investigación indirecta elude muchos de los problemas de investigación directa mencionados anteriormente. Dado que el artefacto previsto no necesita existir, para que se realice la investigación indirecta, a menudo se implementa en las primeras etapas del diseño. Incluso si todavía no existe una nueva construcción de acero, hay muchos programas informáticos disponibles que ayudarán a modelar la construcción y determinar todas las tensiones involucradas. Otra ventaja vinculada a una mayor manejabilidad es el hecho de que la investigación indirecta es a menudo una buena condición sabia. Llevar a cabo experimentos en condiciones favorables es más fácil con la investigación indirecta que con la investigación directa en parte porque tales condiciones se controlan más fácilmente. Debido a todas estas ventajas, los experimentos llevados a cabo durante la investigación indirecta son a menudo más fáciles de repetir, lo que resulta en datos más fiables sobre el modelo. Si estos datos del modelo también dan como resultado un mejor conocimiento sobre el artefacto final depende, por supuesto, de la calidad de la validación de estos datos. La validación sigue siendo el punto débil del modelo de la investigación.

Una rama importante de la investigación indirecta se refiere al uso de modelos informáticos o matemáticos. Los modelos informáticos tienen la ventaja de no tener que reducir el objeto de la investigación a proporciones manejables. Son de escala real. Por lo tanto, los modelos informáticos no tienen que hacer frente a los «efectos de escala», como, por ejemplo, el cambio en la relación de volumen de superficie cuando se escala el tamaño de los objetos. Los modelos matemáticos o informáticos son siempre simplificaciones de la situación de la vida real. Sin embargo, en el proceso se omiten muchos detalles por lo que a menudo es difícil asegurarse de que tales detalles no equivaldrán a grandes imprecisiones en los datos resultantes. Debido a la simplificación inherente a los modelos informáticos o matemáticos, la validación de estos modelos es muy importante. Esta validación puede llevarse a cabo utilizando investigaciones directas o incluso modelos a escala.

Los experimentos con modelos a escala a menudo se llevan a cabo en relación con los problemas existentes en la aerodinámica, la hidrodinámica y la hidráulica, ya que los problemas en estas áreas son a menudo incontrolables desde el mundo. Para realizar cualquier experimento de modelo a escala se necesita primero una construcción física, el modelo de escala m, que es, en los aspectos relevantes, en primer lugar geométricamente, similar al prototipo p. Además del modelo también es necesario tener leyes modelo, ya que los datos experimentales resultantes de experimentos de modelos a escala deben ampliarse (o reducirse) para ser relevantes para el prototipo previsto. Estas leyes modelo determinan las cantidades físicas pertinentes y prescriben las condiciones de similitud para el modelo y el prototipo. Para entender el papel de las leyes modelo, veamos algunos ejemplos importantes.

3.2.- Similitud geométrica

En aerodinámica e hidrodinámica, se tienen en cuenta los siguientes tres tipos de similitud: geométrica, cinemática y dinámica. El primero se refiere a la similitud en las dimensiones y la forma entre el modelo y el prototipo. La segunda, la similitud cinemática se refiere a las similitudes en las velocidades, velocidades y direcciones entre los puntos correspondientes en los dominios modelo y prototipo. Y en tercer lugar, la similitud dinámica tiene que ver con la similitud entre las fuerzas y los componentes de fuerza en el dominio fluido y los cuerpos.

Veamos cómo los ingenieros proceden al aplicar el método de modelos a escala, y explotan la similitud geométrica de las formas. Comenzamos con la correspondencia entre el modelo y la longitud del prototipo, ambos medidos utilizando la misma unidad de longitud. La relación sin dimensiones entre estas dos longitudes se denomina factor de escala lineal, α_L; Así

$$L_p = \alpha_L^2 L_m$$

Dentro de los límites de lo que es prácticamente alcanzable, la elección de L es libre. Una vez elegido el L, los factores de escala de las áreas y los volúmenes también se fijan:

$$A_p = \alpha_L^2 A_m \qquad V_p = \alpha_L^3 V_m \qquad (6)$$

Observe, por cierto, que el factor de escala lineal en las direcciones x, y y z no tiene por qué ser el mismo. Ejemplos de estos modelos de escala distorsionados (como se les llama) son modelos de lechos de ríos donde el factor de escala horizontal es a menudo mucho mayor que el factor vertical. La ecuación (6) nos permite determinar el volumen de cuerpos grandes con una forma complicada. Primero construimos un modelo de escala geométrica similar usando el uso de α_L; después de eso establecemos V_m sumergiendo el modelo de escala y medimos el volumen del fluido desplazado; y usando el valor de α_L^3, podemos calcular V_p.

3.3 Similitudes cinemáticas y dinámicas

Las cosas se vuelven más intrincadas si tenemos en cuenta las relaciones cinemáticas y dinámicas entre el prototipo y el modelo a escala. Un problema dinámico típico de la Aero-hidrodinámica se refiere al movimiento relativo entre el líquido y un cuerpo. En tales casos, las velocidades variables provocan presiones cambiantes que, a su vez, dan lugar a un cambio en las fuerzas de arrastre y elevación, que son las fuerzas paralelas y perpendiculares al vector de velocidad del objeto en movimiento. En la vida real, estos fenómenos son muy complicados y si queremos obtener una visión de estos asuntos, la simplificación es inevitable. Consideramos simplificaciones en dos aspectos, a saber, en relación con fluidos ideales y reales y con o sin superficie libre.

3.3.1.- Líquido ideal y sin superficie libre

Comenzamos con el caso más "simple" en el que el objeto en movimiento no tiene superficie libre, lo que significa, que está completamente sumergido en el fluido, que, en el presente caso, se supone que es ideal. Esto último significa que el fluido es viscoso o muy 'delgado' y no tiene ninguna "fricción de fluidos" interna; además se supone que es incompresible. Un fluido ideal es además homogéneo, lo que significa que su densidad es constante en todas las partes en el tiempo y en el lugar y la gravedad del fluido no tiene que ser tomada en cuenta. En consecuencia, las fuerzas dominantes son las fuerzas de inercia y las fuerzas de la presión. Idealmente, cuando un objeto está totalmente sumergido en un fluido ideal, las fuerzas de inercia y presión deben estar en equilibrio o deben cancelarse mutuamente a nivel de modelo y prototipo. Esta similitud dinámica implica, por tanto, que el factor de escala de inercia es igual al de las fuerzas de presión. Consideremos esta igualdad.

Comenzamos con el espacio de escalado, y elegimos un factor de escala lineal razonable, que es la relación entre la longitud del prototipo y la longitud del modelo de escala: $L_p = \alpha_L L_m$

A continuación, podemos elegir de nuevo libremente el factor de escala de velocidad, α_v,

$V_p = \alpha_v v_m$ (7)

Y el factor de la escala de densidad, α_ρ:

$\rho_p = \alpha_\rho \rho_m$

Al elegir el valor de α_v, también fijamos el factor de escala de tiempo. Es la relación entre el factor de escala lineal y el factor de escala de velocidad, ya que la distancia es la velocidad por tiempo. Por lo tanto, el factor de escala de tiempo se convierte en:

$$\frac{\alpha_L}{\alpha_v}$$

Además, el factor de aceleración para el modelo de escala se fija mediante el factor de escala lineal y el factor de tiempo, ya que la aceleración es la distancia por tiempo al cuadrado. Por lo tanto, el factor de la escala de aceleración, $\alpha_L/(\alpha_L/\alpha_v)^2$ se convierte en:

$$\frac{\alpha_v^2}{\alpha_L}$$

Si queremos averiguar las fuerzas en el prototipo midiendo las fuerzas en el experimento escalado y si, en ambos casos, las fuerzas de inercia están en equilibrio con las fuerzas de presión, y entonces es una condición necesaria para que el factor de escala de fuerza inercia sea igual al factor de escala de fuerza de presión. Comencemos con las fuerzas inerciales del prototipo. De la ley de Newton de la fuerza resultante sabemos que $F_p^I = m_p a_p$. Puesto que la masa es el volumen ocupado por una densidad, se deduce que el factor de escala de fuerza inercial es el valor de $\alpha_\rho \alpha_L^3 \alpha_v^2/\alpha_L$, que es igual a

$$\alpha_\rho \alpha_v^2 \alpha_L^2 \qquad (8)$$

Si nos dirigimos al factor de fuerza de presión, observamos primero que $F_P^P = P_p A_p$, la fuerza de presión en el prototipo es igual a la presión por el área del prototipo. Según la ley de Bernoulli (o Euler) (2), en la que v es la velocidad relativa entre el prototipo y el fluido, la presión a lo largo de una aerodinámica permanece constante. Por lo tanto, sustituimos P_P = $(1/2)\rho v^2$, y el factor de escala de fuerza de presión se convierte en

$$\alpha_\rho \alpha_v^2 \alpha_L^2 \tag{9}$$

Como (8) es igual a (9), podemos concluir que se han cumplido las condiciones necesarias para la metodología de escala. El factor de escala de fuerza inercial es igual al factor de escala de las fuerzas de presión. Esta igualdad permite escalar el equilibrio de la presión y las fuerzas de inercia en el modelo de escala a la escala del prototipo. Por lo tanto, llegamos a la conclusión de que

$$F_p = \alpha_\rho \alpha_v^2 \alpha_L^2 F_m \tag{10}$$

Tenga en cuenta, por cierto, que la Proposición 33 de Newton (mostrada anteriormente) es la misma que (10), por lo que se llama la ley modelo de Newton. La fórmula (10) también encaja perfectamente, y se confirma en parte por la ecuación de arrastre, que indica que el arrastre de un objeto en un fluido es una función de la densidad del fluido, el cuadrado de su velocidad relativa v, y alguna zona transversal efectiva A_{ref} :

$$F^D = \frac{1}{2}\rho v^2 A_{ref} C_D \tag{11}$$

En esta ley C_D es un coeficiente típico de arrastre, sin dimensiones. Como hemos visto en la sección 2.2.2, Newton ya observó que el arrastre de un cuerpo sumergido en un fluido es proporcional al cuadrado de su velocidad; el segundo corolario de la Proposición 33 dice: "... en el mismo fluido un cuerpo proyectado que se mueve rápidamente, se encuentra con una resistencia que es como el cuadrado de su velocidad, casi. ¿Cómo (11) confirma la proporción de fuerzas en (10)? El argumento depende de la observación que la ley de Newton tiene para cualquier ρ y v y cualquier tamaño de la misma geometría con el factor de escala α_L. Por lo tanto (11) se mantiene para el prototipo y el modelo. Por consiguiente

$$\frac{F_p^D}{\rho_p v_p^2 L_p^2} = \frac{F_m^D}{\rho_m v_m^2 L_m^2} = \text{CONSTANTE}$$

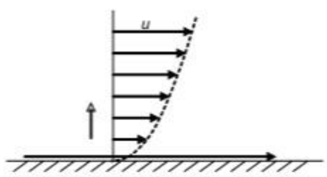
De lo cual se deduce que

$$F_p^D = \frac{\rho_p v_p^2 L_p^2}{\rho_m v_m^2 L_m^2} F_m^D$$

Esto es claramente igual a la fórmula (10). Concluimos con la observación de que, dentro de los límites de la práctica de ingeniería, es la ausencia de restricciones sobre el tamaño de los objetos a los que se puede aplicar la ley de arrastre de Newton los que basen las prácticas de escalado en los tanques de remolque actuales.

3.3.2.- Líquido real y sin superficie libre

El primer paso hacia una situación más realista es considerar fluidos reales donde la viscosidad no se deja fuera de la imagen. Los fluidos viscosos son fluidos homogéneos e incompresibles donde se tiene en cuenta la viscosidad y se deja fuera la gravedad. La viscosidad de un fluido puede verse como la "fricción interna" entre fluido laminar paralelo con diferentes velocidades en una corriente de fluido no turbulenta. Si una hoja de metal se mueve longitudinalmente en un fluido en reposo, suponemos que la lámina más cercana a la hoja se moverá a una velocidad más rápida que el laminado más lejos de la hoja. La viscosidad de un fluido es, por lo tanto, la fricción entre el laminar móvil. Moviéndose longitudinalmente en el fluido, la hoja de metal experimenta una fuerza tangencial causada por la fricción entre las diversas capas de fluidos paralelas a la dirección de su movimiento. Uno puede imaginar que esta fricción es más grande en el paso que en el agua. La siguiente imagen muestra un flujo laminar constante de un fluido paralelo a una placa paralela a este flujo. Los vectores indican las diversas velocidades del flujo laminar.



Como observamos en la sección 2.2.2, la hipótesis de viscosidad de Newton afirma que la tensión de cizallamiento en un pequeño volumen de fluido es linealmente proporcional a su tasa de tensión. Esto puede expresarse como $\sigma = \eta\frac{\partial u}{\partial z}$ el cual η es la viscosidad (cizallamiento) del fluido específico en cuestión. La hipótesis de Newton se ha confirmado en el caso de muchos gases y fluidos simples, en otras palabras, fluidos que no contienen moléculas muy largas. Estos fluidos son newtonianos. Ahora, la fuerza tangencial F_T que el área de las experiencias de volumen es la tensión de cizallamiento veces el área de uno de los lados de ese volumen:

$$F_T = \eta\frac{\partial u}{\partial z}dA \tag{12}$$

La pregunta ahora dice: ¿Cuál es el factor de escala para las fuerzas de fricción en el modelo y el prototipo? A partir de (12) se deduce que es el valor de $\alpha_\eta(\frac{\alpha v}{\alpha L})\alpha_L{}^2$. Esto hace que el factor de escala de las fuerzas de fricción para el modelo y el prototipo sea igual a $\alpha_\eta\alpha_v\alpha_L$, en la que α_η se desconoce. Una manera de determinar el valor α_η es comparando $\alpha_\eta\alpha_v\alpha_L$ al factor de escala inercial o de la fuerza de presión. Considere, por ejemplo, un caso en el que para el prototipo la fuerza inercial es igual a la fuerza de fricción. Estas fuerzas también tienen que ser iguales en el modelo. A continuación, se deduce que $\alpha_\rho \alpha_v^2 \alpha_L^2 = \alpha_\eta \alpha_v \alpha_L$, el factor de escala de fuerza de fricción sigue trivialmente.

$$\alpha_\eta = \alpha_\rho \alpha_v \alpha_L$$

Si reescribimos esta fórmula en términos de longitudes, velocidades, densidades y viscosidades para modelos y prototipos, es fácil ver que llegamos a:

$$\frac{\eta_p}{\eta_m} = \frac{\rho_p V_p L_p}{\rho_m V_m L_m}$$

Dado que los lados izquierdo y derecho muestran números sin dimensiones, la multiplicación transversal del numerador por el denominador vuelve a dar como resultado números sin dimensiones.

$$\frac{\rho_m V_m L_m}{\eta_m} = \frac{\rho_p V_p L_p}{\eta_p}$$

El número sin dimensiones a cada lado del signo de la ecuación se denomina número Reynolds. Los experimentos de escalado a menudo se llevan a cabo sin cambiar el líquido. En tales circunstancias, el número de Reynolds se expresa convenientemente utilizando el valor de $\gamma = \eta/\rho$, ya que η y ρ son características específicas del fluido considerado. El número de Reynolds se convierte entonces en:

$$Re = \frac{v.L.\rho}{\eta} = \frac{v.L}{\nu} \tag{13}$$

Si queremos un comportamiento turbulento similar en el modelo y el prototipo, debemos mantener Re igual en ambas situaciones. Esta última restricción se suele llamar ley modelo de Reynolds; garantiza similitud con respecto a las fuerzas de presión, inercia y viscosidad tanto para el modelo como para el prototipo. Si nos quedamos con el mismo fluido, la ley modelo de Reynolds se reduce a:

$$v_m = v_p \frac{L_p}{L_m} \tag{14}$$

Si queremos satisfacer la ley modelo de Reynolds y el modelo es más pequeño que el prototipo, la velocidad del modelo debe superar la del prototipo. Mientras que con fluidos ideales la ley empírica sobre arrastre garantiza la libertad de elegir la velocidad del modelo y el prototipo (siempre y cuando (10) se obedezca), esta libertad de elección desaparece cuando se introducen fuerzas de fricción. En aras de buenas pruebas y extrapolaciones válidas, el número Reynolds debe ser el mismo en el modelo y en el caso del prototipo. Y como η y ρ se mantienen para el mismo caso de acuerdo a (14), la elección de la α_L y la velocidad del prototipo determinan la velocidad del modelo. Veremos que las limitaciones implícitas por (14) contradicen las implícitas por el antecedente de (1).

Para hacer las cosas algo más concretas, consideremos un ejemplo en el que el prototipo tiene 100 m de largo y se mueve con una velocidad de 10 m/s en agua con el número y= 10^{-6}. El número de Reynolds en este caso es 10^9. Supongamos que elegimos el valor α_L = 10, lo que significa, para un prototipo de 100m que trabajaremos con un modelo de 10m. Puesto que el valor de la y es 10^{-6}, ya que el agua permanece agua, el valor de V_m siguiendo el valor fijo de Re a 10^9, será de 100 m/s. Esto significa que tenemos que probar el modelo de báscula a una velocidad de 100 m/s (= 360 km/u). Estas velocidades sólo son factibles en túneles de viento y túneles de circulación e implican altas temperaturas, grandes fuerzas, alta potencia, pruebas costosas, etc.

Tabla 1. Velocidad del modelo en el caso Reynolds

	Modelo	Prototipo
L_p	10 m	100 m
v_p	100 m/s! ←	10 m/s
ν	10^{-6}	10^{-6}
Re	10^9	10^9

3.3.3 en líquido viscoso con una superficie libre

El segundo paso posible al pasar del caso fluido ideal a una situación de prueba más realista es tener en cuenta la fuerza de gravedad en lugar de añadir viscosidad a la caja de fluido ideal. En el caso de un fluido viscoso con una superficie libre, estamos de nuevo tratando con un fluido homogéneo e incompresible con gravedad pero sin viscosidad. La fuerza de gravedad representa las ondas superficiales que forman una fricción sustancial para, por ejemplo, mover barcos. Así, en el presente caso, la fuerza dominante junto con las fuerzas de inercia y presión es la gravedad. La fuerza gravitacional de un objeto es su masa por la aceleración de la gravedad para el modelo de escala y el prototipo. Por lo tanto, el factor de escala de fuerza gravitacional de la fuerza gravitacional es el factor de escala de la masa, $\alpha_\rho\alpha_L^3$, veces el factor de escala de la aceleración de la gravedad, α_g:

$$\alpha_\rho \alpha_L^3 \alpha_g \qquad (15)$$

Una vez más, si la fuerza gravitacional en el prototipo es igual, por ejemplo, a la fuerza de presión, lo mismo debe contener para el modelo de escala, y por lo tanto los factores de escala respectivos deben ser los mismos: $\alpha_\rho\alpha_L^3 \alpha_g = \alpha_\rho\alpha_v^2\alpha_L^2$

$$\alpha_v^2 = \alpha_g \alpha_L.$$

Con un argumento similar al utilizado en el caso de Reynolds se puede llegar fácilmente al número Froude:

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

Que, de nuevo, debe ser el mismo en ambas situaciones con el fin de crear similitud entre el modelo y el prototipo. Esta es, como veremos, exactamente la misma restricción que se indica en el antecedente de la fórmula (1). La identidad del número de Froude sin dimensiones en la situación del modelo y prototipo se llama la ley modelo de Froude. Si se cumple la ley de Froude, la velocidad del modelo y el prototipo serán los siguientes:

$$(16) \qquad v_m = v_p\sqrt{\frac{L_m}{L_p}}$$

En aras de las buenas pruebas y la extrapolación válida, los cálculos deben satisfacer la ley modelo de Froude. En contraste con la restricción de satisfacer la ley de Reynolds, si el modelo es más pequeño que el prototipo, la ley modelo de Froude implica que la velocidad del modelo tiene que ser más pequeña en lugar de mayor que la velocidad del prototipo. Por consiguiente, en el contexto de la modelización a escala marítima, las limitaciones (14) y (16) contradicen y no pueden cumplirse al mismo tiempo.

En las circunstancias del ejemplo anterior, la fórmula (16) no deja libertad para la velocidad del modelo; tiene que ser de 3,2 m/s, lo que es factible para cuencas de olas y tanques de remolque. Si, en estas circunstancias, tomamos la aceleración gravitacional en 10 m/s^2, el número de Froude F_n será 0.32.

Tabla 2. Modelo de velocidad en el caso Froude

	Modelo	Prototipo
L_p	10 m	100 m
v_p	3.2 m/s! ←	10 m/s
G	10 m/s²	10 m/s²
F_n	3.2	3.2

El método de prueba de acuerdo con la ley de Froude comienza con la elección del factor de escala α_L de la longitud, a partir del cual siguen los factores de escala de área y volumen, y son de α_L^2 y α_L^3, respectivamente. A partir de (16) se deduce que los factores de velocidad y escala de tiempo son iguales a $\sqrt{\alpha L}$. Naturalmente, la aceleración gravitacional sigue siendo la misma y si el fluido sigue siendo el mismo, (15) implica que las fuerzas en el prototipo son de α_L^3 por las fuerzas del tipo de modelo, de acuerdo con la ecuación (1). Sin embargo, hasta ahora, el factor de escala relevante para las fuerzas relacionadas con la viscosidad, se ha quedado completamente fuera de la imagen. Las fuerzas relacionadas con la viscosidad son importantes en el método de extrapolación de Froude que examinaremos en la siguiente sección.

3.3.4 Método de extrapolación de Froude

En la sección anterior vimos que cuando una nave parcialmente sumergida se mueve en un fluido, experimenta resistencia en tres aspectos. En primer lugar, las fuerzas de presión constituyen un arrastre de forma; en segundo lugar, la viscosidad del fluido impone una fuerza de fricción, que es mayor cuando se mueve en jarabe grueso que en agua; y en tercer lugar, dado que el barco está parcialmente sumergido, eleva el líquido en forma de ondas, que serán menos en jarabe que en agua. La segunda y tercera fuerza se relacionan con las leyes modelo de Reynolds y Froude. Además, vimos que las restricciones de escala para extrapolar la onda-haciendo resistencia contradicen las de extrapolación de las fuerzas de fricción creadas por la viscosidad. El primero requiere que la velocidad del modelo sea inferior a la del prototipo, el segundo requiere lo contrario; la velocidad del modelo debe ser mayor que la del prototipo. No es raro en la práctica de ingeniería tener restricciones completas que se contradicen entre sí. William Froude, sin embargo, encontró una solución práctica.

Con retrospectiva, el principio del método de extrapolación de Froude no es complicado. La idea principal es que, con respecto a los modelos y prototipos de escala geométricamente similares, la resistencia total de un recipiente a cualquier velocidad razonable es aproximadamente la superposición de la resistencia a la formulación de ondas y la fricción de la piel, tanto para el modelo como para el prototipo. La fricción de la piel causada por la viscosidad se puede calcular de forma independiente para modelos y prototipos utilizando la fórmula (11), que está destinada a cuerpos totalmente sumergidos. La onda que hace resistencia del modelo entonces es igual a su resistencia total menos la fricción de la piel calculada. Esta resistencia de fabricación de ondas se puede escalar hasta el tamaño del prototipo utilizando la ley modelo (1) establecida por Reech y Froude. Y finalmente la resistencia total del prototipo es igual a la resistencia a la fabricación de ondas escalada más la fricción de la piel calculada usando (1).

La ecuación piel de fricción exhibe un C_D de coeficiente de arrastre o fricción de la piel. Este coeficiente, que en el contexto del tanque de remolque, se conoce como Coeficiente de Resistencia de Fricción C_F, ha sido objeto de mucha investigación durante muchos años. Finalmente, en 1957 en la Conferencia Internacional de Tanques de Remolque se decidió fijar este coeficiente de la siguiente manera:

$$C_F = \frac{0.075}{({}^{10}\log Re - 2)^2}$$

Dado que el número de Reynolds Re = vLρ/η, para un casco de cualquier dimensión, el coeficiente de resistencia a la fricción se puede calcular utilizando la velocidad y la longitud del área húmeda del casco, y la densidad y viscosidad del fluido. (Curiosamente, William Froude nunca publicó las constantes de fricción de la piel que utilizó para calcular la fricción de la piel de los modelos o el barco real, aunque, por supuesto, estos valores se pueden deducir de los gráficos y tablas publicados en [Froude, 1872], y [Froude, 1874]. En [1888], el hijo de William Edmund publicó los valores de las constantes de fricción de la piel que utilizó y sólo después de la publicación [Payne, 1936] las constantes de fricción de la piel de William Froude se volvieron más ampliamente disponibles.). Por lo tanto, para todas las velocidades razonables del modelo y el prototipo la forma de calcular la resistencia total es la siguiente:

1. Tome un modelo que sea geométricamente similar al prototipo y deje que la velocidad del prototipo sea el valor de $\sqrt{\alpha L}$., en aguas tranquilas, sin interferencias de la resistencia al aire, y mida su resistencia total.

2. Calcular la resistencia a la fricción de la piel del modelo utilizando la ecuación (11)

3. Restar la resistencia a la fricción de la piel del paso 2 de la resistencia total del modelo medida en el paso 1 para obtener la resistencia de la onda del modelo

4. Multiplique esta última onda o resistencia residual del modelo por α_L^3, de modo que el resultado sea la resistencia estimada de la resistencia del prototipo del prototipo

5. Una vez más, calcule una resistencia a la fricción de la piel usando la ecuación (11) pero ahora para el prototipo

6. Agregue la onda escalada haciendo resistencia del paso 4 a la resistencia a la fricción de la piel del prototipo dado en el paso 5.

7. Este último número será la resistencia pronosticada del prototipo a la velocidad estipulada en el paso 1.

Dado que este método se aplica a cualquier par razonable de velocidades de modelo y prototipo, nos proporciona la resistencia total del prototipo para cualquier velocidad. Esta forma de predecir la resistencia de los prototipos de buques extrapolando los datos de los modelos a escala reducida se conoce bajo el nombre del método de extrapolación de Froude. Sigue siendo el método de escalado básico de hoy en día utilizado en laboratorios de tanques de remolque en todo el mundo.

4.- PRODUCCIONES DE CONOCIMIENTO DEL MODELO A ESCALA

En las secciones anteriores, hicimos dos observaciones. En primer lugar, consideramos la virtual ausencia de cualquier conexión sistemática entre los diversos desarrollos históricos en hidráulica experimental e hidrodinámica, aunque en última instancia los números de Froude y Reynolds encontraron su camino en el Navier-Stokes Ecuaciones. En segundo lugar describimos la reconstrucción racional de la escala en la arquitectura naval y el método de extrapolación de Froude. Por último, en la presente sección, pasaremos a ciertos fundamentos filosóficos y a la forma en que se produce el conocimiento aplicando metodologías de escalado.

Los filósofos de la ciencia no han prestado mucha atención a los detalles del modelado de escala. Dos artículos escritos por Susan Sterrett forman una excepción bienvenida a esta falta de atención, [Sterrett, 2002; 2006]. Curiosamente se centra en los modelos a escala debido a su interés en el razonamiento basado en modelos. En [2002], Sterrett 'examina cómo se utilizan los modelos a escala para hacer inferencias', y en [2006], concluye que 'a menudo no son modelos más detallados ... sino más bien un uso perspicaz del conocimiento en la mano para determinar qué principios de similitud son apropiados para permitirnos inferir lo que no sabemos de lo que somos capaces de observar.» Gran parte de lo que se discutirá en la presente sección está en línea con, y a veces incluso se inspira en, los papeles de Sterrett, que forman una lectura adicional interesante. En esta sección, consideraremos tres aspectos fundamentales relacionados con sacar conclusiones de las manipulaciones de modelos a escala en la arquitectura naval. Estos temas son: el carácter especial de los modelos a escala, el papel y el carácter de las leyes de modelos en el modelado a escala; y finalmente la pregunta sobre la fuente de la información empírica originada en la manipulación de unidades.

4.1.- Carácter especial de los modelos a escala

Volvamos al primer tema, el carácter especial de los modelos a escala. Sterrett señala correctamente que en la literatura, los modelos a escala a veces se diferencian de los otros tipos de modelos utilizados en la ciencia. Ludwig Boltzmann [1902] y Mary Hesse [1967] sirven como ejemplos. En su conocida entrada 'Modelo' en la Enciclopedia Británica en [1902], Boltzmann distingue claramente entre modelos científicos y modelos 'experimentales', «que presentan a pequeña escala una máquina que posteriormente se completará en una mayor, con el fin de permitirse un ensayo de sus capacidades. Boltzmann no menciona modelos «escala» o «analógicos», pero debe haber tenido modelos a escala en su mente, ya que añade: «Aquí hay que señalar que una mera alteración de las dimensiones a menudo es suficiente para causar una alteración material en la acción desde las diversas capacidades dependen de varias maneras de las dimensiones lineales.» Para los modelos a escala de Boltzmann, eran sólo de importancia secundaria; sólo dedica los dos últimos párrafos de su entrada Británica a ellos.

En su clasificación de modelos, aparte de "los sentidos del modelo" que son más centrales para la estructura de la "ciencia teórica", Hesse también distingue entre modelos lógicos y "replicas y máquinas analógicas" como que representan dos sentidos extremos de la palabra ' modelo'. A partir de estos dos grupos, que considera las bases más importantes para la aplicación del término "modelo" en la ciencia, toma el segundo para estar más cerca del sentido del lenguaje ordinario del modelo? Aunque Hesse menciona túneles de viento, ella no considera usos específicos de ingeniería para modelos. Sin embargo, curiosamente, menciona, que las máquinas analógicas se hacen a menudo en situaciones en las que carecemos de las leyes matemáticas o especificaciones para el sistema modelado, o donde las matemáticas son tan complejas que sacar conclusiones prácticas confiables es imposible. Esto a menudo se mantiene en situaciones de arquitectura naval de las que elegí mis ejemplos.

4.1.1.- Misma física

Observar el carácter específico de los modelos a escala es una cosa, pero la tarea filosófica es, por supuesto, analizar la naturaleza de este personaje específico. Una forma en la que los modelos de escala difieren de muchos otros tipos de modelos es, desde el punto de vista que no son modelos simplificados, más abstractos o reducidos de ninguna manera. En cuanto al modelado a escala en la arquitectura naval, la física alrededor de los modelos a escala que se mueven en el agua es del mismo nivel de complejidad que la del prototipo. Por ejemplo, teóricamente, el fenómeno de la resistencia del modelo a escala no es en ningún sentido más simple o más perspicuo que el mismo fenómeno cuando está relacionado con un barco de tamaño completo (Froude menciona explícitamente esta similitud en [1869]). El método de extrapolación de Froude ilustra esta equivalencia de complejidad física entre modelo y prototipo; después de todo, la misma fórmula se utiliza para calcular la resistencia viscosa o fricción de la piel del modelo y el prototipo. La diferencia es, por supuesto, que producir, medir y ajustar la evidencia experimental para un modelo reducido es mucho más fácil. En principio, los procesos físicos son exactamente del mismo tipo que los de los fenómenos modelados y la complejidad de la física no se reducen. Es sólo por su tamaño que pueden ser estudiados directamente en un laboratorio y eso es lo que los hace epistemológicamente más manejables.

La identidad de la complejidad física de cualquier modelo y prototipo se muestra aún más claramente si consideramos la relación entre la teoría científica y el objeto de estudio. Supongamos que el manual H describe la teoría física pertinente, incluida la heurística más importante, sobre cómo construir buques de navegación marítima. H se verá entonces para prescribir cómo construir buques de todo tipo y dimensiones. Sin embargo, probablemente no será útil para el diseño de buques de menos de dos metros. La razón de este límite inferior es puramente práctica; buques de navegación marítima más pequeños no tienen ningún uso. Sin embargo, si los modelos a escala son mayores que el límite inferior de H, se dirá que la teoría de H describe el modelo y el prototipo y ambos se considerarán de igual complejidad. Sin embargo, por lo general, el objetivo al construir la mayoría de los modelos, es dejar fuera de la imagen tantas complejidades del mundo real como sea posible. Por lo tanto, los modelos a escala se desvían de los modelos científicos en que tienen el mismo nivel de complejidad que su original.

Por supuesto, con factores de escala extremos, los mecanismos físicos subyacentes al comportamiento de la nave y al del modelo pueden cambiar. Un ejemplo extremo de tal cambio sería si el tamaño del recipiente fuera comparable al de las partículas coloides para que los movimientos Brownianos llegaran a ser relevantes. En tal situación, no podríamos aplicar el modelado a escala de Froude, pero incluso entonces, nada nos impediría estudiar las propiedades físicas pertinentes.

4.1.2.- No intermediación

Consideraciones similares a las de la sección anterior respaldan la observación de Sterrett de que los modelos a escala no encajan en la imagen familiar de los modelos que intermedian "entre algo abstracto y algo concreto", como se propugna en la obra de Morgan y Morrison [1999]. En este sentido difieren significativamente de los modelos teóricos en el sentido descrito por Hesse, porque los modelos pueden considerarse demasiado intermedios entre las teorías abstractas y los fenómenos. Naturalmente, uno podría objetar que en cierto sentido los modelos de escala hacen intermedio entre el prototipo final y la teoría de la construcción naval. Esto sólo se mantiene superficialmente porque pasa por alto una diferencia importante. Para ilustrar esta diferencia, consideremos el conocido modelo de carbono en la química. Normalmente, un modelo de este tipo se construye a partir de bolas de madera o plástico sostenidas con palos en ángulos tetraédricos de aproximadamente 109,5o. Sin embargo, en aras de la discusión, consideraremos que un modelo de carbono de bola y palo está hecho de hielo en lugar de madera. El modelo de carbono del hielo, media entre la madera quemada en la realidad y la teoría molecular de la materia.

La diferencia entre el modelo a escala del arquitecto naval y el modelo de bola y palo no es que uno represente una situación concreta en el mundo real, mientras que el otro no, ya que ambos son concretos. Tampoco es la diferencia de que uno sea escala mientras que el otro no lo es, porque en cierto sentido el modelo de bola y palo podría considerarse como un modelo escalado también. La diferencia importante entre los dos modelos es que la teoría sobre la resistencia al modelo de escala en fluido viscoso con una superficie libre es precisamente la misma teoría que describe la resistencia del prototipo. Las ecuaciones Navier-Stokes predicen el arrastre de ambos modelos, y aparte del gran número de cálculos, en teoría ambas situaciones podrían calcularse de la misma manera. Sin embargo, la situación es muy diferente, con nuestro modelo de carbono de bola y palo. Allí, la teoría sobre los enlaces químicos no se aplica al modelo de carbono de bola y palo hecho de hielo, porque se trata de carbono en el mundo real y el modelo no contiene moléculas de carbono. Además, la teoría sobre los enlaces al carbono nos dice que si calentamos el carbono a cien grados centígrados, los enlaces permanecerán intactos mientras que los enlaces en nuestro modelo de carbono hecho de hielo no lo harán.

En el ejemplo anterior se indica claramente la diferencia entre el modelo de escala y el modelo de intermediación. En el primer caso, la relación del modelo teórico es igual a la relación del prototipo teórico, mientras que en el segundo caso estas relaciones difieren sustancialmente. Por otra parte, la física del modelo de bola y palo difiere significativamente de la física del carbono de la vida real. Por lo tanto, el modelo de bola y palo cumple una condición necesaria para que un modelo pueda intermediar entre la teoría y los fenómenos, a saber, la diferencia entre modelo y fenómeno en términos de sus propiedades físicas. Sin embargo, vimos en la sección anterior, que la física del modelo y el prototipo son los mismos y que el modelado de escala por lo tanto viola esta condición necesaria. En consecuencia, los modelos a escala no logran intermediar entre la teoría y los fenómenos.

4.1.3.- No hay necesidad de leyes fundamentales

Además de la observación de que los modelos a escala implican el mismo tipo de fenómenos físicos que el prototipo, Sterrett da otro argumento interesante que respalda la opinión de que los modelos a escala no son intermediarios en la forma en que los modelos teóricos tengan una condición especial. Ella observa con razón: "No es necesario que estemos en posesión de leyes o ecuaciones que, incluso en principio, serían suficientes para predecir lo que sucede en el modelo o en el objeto modelado', [2002, p.59]. Las "leyes o ecuaciones" de esta cita se refieren a las ecuaciones diferenciales teóricas abstractas que en última instancia rigen los fenómenos en estudio.

Como se ilustra en la sección anterior, ni Froude, ni sus colegas en arquitectura naval, que utilizaron metodologías de modelos a escala, utilizaron las ecuaciones Navier-Stokes para predecir el comportamiento del prototipo. Incluso hoy en día, con toda la potencia computacional que tenemos a nuestra disposición, sigue siendo demasiado complejo resolver estas ecuaciones para los buques de navegación marítima. En las secciones anteriores, vimos que Froude abordaba el problema utilizando la metodología científica de la misma manera que

John Smeaton (1724-1792) lo hizo antes que él. Formuló su ley modelo fenomenológico, se esforzó por confirmarlo, y después de separar la fricción de la piel de la resistencia a las ondas, decidió aplicar sólo su ley de cubos a esta última. En cuanto al modelado de escala en tanques de remolque, el punto de Sterrett sobre las ecuaciones Navier- Stokes es incondicionalmente correcto.

Uno podría comentar que Edme Mariotte (1620-1684) y Robert Boyle (1627-1691) progresaron de la misma manera que Froude. No necesitaban tener conocimientos de mecánica estadística para aplicar sus leyes para predecir la presión de un gas cuando su volumen cambió isotérmicamente. Sin embargo, hay una diferencia: la ley de Boyle no tiene nada que ver con los modelos. Además, la ley de Boyle parece ser más una descripción empírica general, mientras que la ley de Froude parece expresar sólo una declaración condicional. En la sección 4.2.4, profundizaremos en las similitudes y diferencias entre el carácter de la ley de Boyle y la ley modelo creada por Froude.

Si los modeladores de escalado, utilizando sólo reglas de similitud, pueden administrar sin conocimiento sobre las ecuaciones físicas subyacentes, ¿estas ecuaciones deben ser totalmente erradicadas de las estrategias de escalado modernas? Sterrett aborda esta pregunta en [2002]. Su respuesta se adhiere a la línea de pensamiento tradicional: el modelado de escalas se basa en el análisis de dimensiones, que utiliza consideraciones teóricas para encontrar las cantidades físicas relevantes para la cuestión de escala en cuestión. Su respuesta dice: 'Las leyes [es decir, ecuaciones teóricas, SZ] se utilizan para ayudar a determinar qué condiciones producen situaciones físicamente similares (con respecto a un determinado fenómeno).'. No se utilizan para predecir nada directamente, sino más bien para averiguar de qué cantidades depende un determinado fenómeno (es decir, viscosidad, densidad, velocidad, temperatura, longitud, etc.), [2002, p. 63]. Como hemos visto, esta no es enfáticamente la forma en que Froude llegó a su método de extrapolación. En primer lugar, no utilizó la constante sin dimensiones de que ahora un día lleva su nombre, ni establece que su trabajo en la escala de modelos se fundó en las ecuaciones Navier-Stokes. No sabemos cómo Froude determinó cuáles eran las variables físicas relevantes en los experimentos del modelo; probablemente, fue su ingenio de ingeniería lo que le trajo su éxito, ya que llevar a cabo, incluso miles de experimentos modelo no mostró ideas similares a las que Llegó Froude (Presuntamente, John Scott Russell, un arquitecto naval de considerable nivel, había llevado a cabo veinte mil experimentos modelo [Cooper, 1872, p. 827]. A pesar de la abundancia de sus datos de experimentos modelo de alta calidad, no llegó a conclusiones fiables sobre la resistencia de los buques a gran escala. Ese fracaso le llevó a creer que era imposible llegar a predicciones fiables sobre la resistencia de prototipos extrapolando los datos de los experimentos de modelos.)

En el contexto del descubrimiento, Sterrett describe correctamente la aplicación moderna del análisis dimensional a varios campos de investigación. Si los investigadores aplican el método de análisis de dimensiones, las ecuaciones fundamentales sólo se emplean para averiguar cuáles son las cantidades físicas relevantes en el modelo. Sin embargo, para desarrollar un análisis filosóficamente equilibrado de la modelización de escalas, no debemos olvidar el contexto de la justificación. En el caso de Froude, es la confirmación a través del experimento Greyhound, en combinación con la versión sin dimensiones de las ecuaciones

Navier-Stokes, lo que aumenta nuestra confianza en el método de extrapolación de Froude. Debemos reconocer que las ecuaciones teóricas, tal vez de una manera computacionalmente intratable, todavía pueden decirnos lo que sucederá en las circunstancias del modelo. Por lo tanto, las ecuaciones subyacentes desempeñan un papel importante en el contexto de la justificación.

Para concluir, los modelos de escalado son especiales, ya que cuentan con la misma física que la cosa modelada; no están, como los modelos teóricos, intermediando entre la teoría y los fenómenos; y, por último, su aplicación no requiere ningún conocimiento de las leyes físicas subyacentes, como lo confirman las prácticas de escalado de Froude. En la siguiente sección analizaremos la naturaleza de las reglas de similitud o las leyes modelo.

4.2 Papel y carácter de las leyes de similitud

Por lo general, la base teórica del modelado de escala se toma como análisis dimensional. (Véase, para una interesante presentación del análisis dimensional y sus fundamentos el capítulo 7 de Susan Sterrett titulado 'Similaridad y análisis dimensional' en esta compilación.) El análisis dimensional se ha desarrollado a partir de algunas observaciones plausibles sobre la combinación de mediciones y matemáticas en las ciencias exactas. Hablemos de los tres más importantes. En primer lugar, podemos observar que las leyes fundamentales de la física no dependen de las unidades que se utilicen. (No todo el mundo considera que esto es trivial; véase, por ejemplo, [Luce et al., 1971, Sección 10.10], [Narens, 2002] y [Luce, 1996].). En [2002, p. 30], Narens formula esta idea como el principio de invariancia dimensional: 'una relación numérica que expresa una relación física válida entre variables físicas tiene la misma forma matemática sin importar a qué medidas apropiadas se utilicen para medir las variables físicas.» La ecuación de Bernoulli (2) o las leyes de movimiento de Newton se aplican, independientemente de si medimos las variables según el SI, el CGS, el sistema de masas británico o cualquier otro sistema métrico con la misma elección de dimensiones fundamentales.

En segundo lugar, no tenemos tantas unidades básicas como cantidades físicas, por lo que distinguimos entre unidades fundamentales y derivadas. La unidad de fuerza en el sistema SI es el 'newton', que se reduce a kgm/s^2. El sistema SI cuenta con siete unidades básicas e incluso podríamos gestionar con menos. En el análisis dimensional, todas las unidades derivadas se reducen a las unidades básicas del sistema. En [2002, p. 30], Narens hace el mismo punto sobre la posible reducción de todas las unidades derivadas. Continúa formulando un principio fundamental sobre las cantidades físicas básicas: "las mediciones físicas adecuadas de una cantidad física básica están relacionadas por multiplicaciones por reales positivos". Según Narens, el análisis dimensional está estrechamente relacionado con los dos principios que acabamos de mencionar. Afirma: «A los efectos de su sección, podemos considerar el análisis dimensional como un conjunto de técnicas que explotan sistemáticamente» el principio de invariancia dimensional y el principio sobre las cantidades físicas básicas.

En tercer lugar, con cualquier ecuación en la física, el lado izquierdo debe mostrar la misma dimensión o debe tener la misma unidad, como el lado derecho; y para cualquier suma o diferencia entre dos términos la dimensión de los dos debe ser la misma. Las ecuaciones que llenan esta restricción se denominan ecuaciones "dimensionalmente homogéneas". Esta homogeneidad también es relevante para las constantes. Si x = cy y la dimensión de la cantidad x difiere de la de y, entonces c es una constante dimensional. A diferencia de las constantes puras, que se derivan de manipulaciones matemáticas, estas cantidades dimensionales no pueden ser invariables en las transformaciones de escala. Los principios de homogeneidad y de no ser-invariables en las transformaciones de escala se han convertido en el II-teorema de, que establece lo siguiente. Cualquier ecuación en n variables y k unidades fundamentales o básicas de medida, que describan correctamente un fenómeno físico, se puede reescribir como una ecuación con k - n variables sin dimensiones. El número Froude es un ejemplo bien conocido de una variable de este tipo.

4.2.1.- Implicaciones empíricas de la suposición de la escala de la relación

Cualquiera que se encuentre con análisis dimensional por primera vez se preguntará cómo las manipulaciones analíticas con unidades que son elegidas por la convención, posiblemente pueden producir conocimiento empírico sobre el mundo. (Despite Quine apasionado, sin intentar degradar la distinción analítico-sintética, cada relato del análisis dimensional aborda el aparente "rendimiento empírico de la cuestión de las manipulaciones analíticas") Según Ellis, el análisis dimensional no está sin su contenido empírico, que entra como sigue: utilizamos nuestra experiencia física cuando decidimos qué factores físicos deben tenerse en cuenta para el fenómeno en juego (factores); hacemos lo mismo cuando establecemos el conjunto de todas las constantes dimensionales relevantes (constantes); y, por último, el conocimiento entra con las «formas estándar de las leyes numéricas básicas contenidas en las propias fórmulas dimensionales» (formulario), [1966, Chap ix, secta F]. Sterrett añade a estas consideraciones que, utilizando un modelo a escala con la misma física que el prototipo, también añadimos 'una rebanada real del mundo' a los argumentos de modelado de escala, [2002, p. 64]. No vamos a entrar en todos los detalles de este tema fascinante ahora, pero nos concentraremos en su lugar en el caso de Froude y referir al lector interesado al capítulo 7 de Sterrett sobre el análisis dimensional incluido en la presente compilación.

En la literatura de ingeniería de hoy en día, los métodos de escala y extrapolación de Froude se justifican por el análisis dimensional, que es comprensible desde una perspectiva sistemática. Sin embargo, para un análisis filosófico más profundo de los esfuerzos de Froude, este enfoque no es del todo satisfactorio por dos razones. En primer lugar, es un anacronismo ya que Froude no utilizó constantes sin dimensiones en ninguno de sus escritos; y en segundo lugar, pero no menos importante, Froude nunca hizo referencia a las ecuaciones Navier-Stokes, mientras que en el análisis dimensional moderno, los investigadores siempre se refieren a las ecuaciones teóricas subyacentes para decidir cuáles son las cantidades físicas relevantes.

Por lo tanto, es inapropiado encontrar nuestro análisis filosófico de las prácticas de escalado de Froude en el análisis dimensional. Esto es especialmente cierto si se considera que las prácticas de escalado de ingeniería más antiguas se entienden bien desde una perspectiva más fundamental que la del análisis dimensional integral. La suposición en cuestión es la de que una característica empírica particular de los objetos físicos implicados es medible en una escala de relación. Esto resulta ser una garantía suficiente para la posibilidad de escalado.

La afirmación de que una propiedad fenomenológica es extensa y medible en una escala de relación, es una declaración con un contenido empírico considerable. Para llegar a una comprensión adecuada de esta declaración, pasemos a la definición de la estructura de la relación. Diré que en realidad una propiedad tiene una 'estructura de relación-escala' si todos sus valores de escala f cumplen con las siguientes reglas de una escala de relación [Carnap, 1995, p.73]: (Por simplicidad, adoptaré el punto de vista realista ingenuo de que los objetos y propiedades existen en el mundo fuera de nosotros.)

1. Regla de igualdad $: e \sim d \Longleftrightarrow f(e) = f(d)$
2. Regla de adición $: f(e \oplus d) = f(e) + f(d)$
3. Regla de la unidad: para específico u: $f(u) = 1$

La regla de igualdad establece que dos objetos están en equilibrio o pueden cancelarse entre sí ($e \sim d$), con respecto a la propiedad relevante si y solo si sus valores de escala son los mismos. (Tenga en cuenta que la noción de equilibrio encaja perfectamente si las propiedades son fuerzas, por lo que son apropiadas para el método de extrapolación de Froude. Con otras cantidades extensas, el término se utiliza en un sentido más figurativo.) La regla de igualdad divide el mundo en clases de objetos con los mismos valores de escala. De acuerdo con la regla aditiva, el valor de escala de la concatenación de dos objetos en realidad ($e \oplus d$) es igual a la suma de los valores de escala de los dos objetos individualmente. En física, la regla de los aditivos también se llama a veces el principio de superposición. En cuanto al método de extrapolación de Froude, implica que el resultado neto de la resistencia a la formulación de ondas y la fricción de la piel es igual a la suma de ambas formas individuales de resistencia. Por último, la regla de unidad establece la unidad para la escala. En las ciencias físicas, hay una abundancia de cantidades de relación-escala como, por ejemplo: longitud espacial, fuerza, volumen, masa, voltaje y resistencia.

Aunque las reglas de la relación pueden parecer triviales, cuando se combinan tienen consecuencias importantes. Una de estas consecuencias, que son relevantes para nuestros propósitos, es que permiten la multiplicación de un valor de escala. De las dos primeras reglas se desprende que:

$$(17) \qquad e \sim (d_1 \oplus d_2 \oplus \ldots \oplus d_c) \Longleftrightarrow f(e) = c.f(d_i).$$

Por lo tanto, el objeto e está en equilibrio con c concatenaciones de objetos d_i, todos los cuales, tienen el mismo valor de escala, si y sólo si el valor de escala de e es c veces el valor de escala de cualquier d_i. La Fórmula (17), a su vez, permite la escalabilidad de los equilibrios. ¿Qué significa esto? El equilibrio entre objetos con una propiedad extensa, por ejemplo fuerza, se puede transferir o escalar a cualquier otro lugar de la escala para que vuelvan a alcanzar el equilibrio. Por lo tanto, si la ponderación e está en equilibrio con los pesos d y d' en una balanza, entonces cualquier triple de E, D y D' estará en equilibrio de nuevo, siempre que f(E)/f(e) = f(D)/f(d) = m y D ~ D'. Más formalmente, podemos afirmar que para cualquier e, d, E y D que satisfaga las restricciones mencionadas fórmula (17) implica

$$(18) \qquad f(e) = n.f(d) \leftrightarrow f(E) = n.f(D)$$

Puesto que ambos se mantienen si y sólo si m.f(e)-n.m.f(d). Si aplicamos la regla de igualdad a (18), vemos que permite que cualquier equilibrio entre e y un número de d_i sea escalable a un equilibrio entre E y D. Por supuesto, la ecuación (18) no indica que todo este equilibrio existe en la naturaleza; sólo indica dónde se ubicaría el equilibrio escalado si la naturaleza nos proporcionara todos los bloques de construcción necesarios.

Las declaraciones que afirman que una determinada propiedad física tiene una estructura de escala de relación tienen un contenido empírico considerable. Para ver esto, basta observar que con cantidades físicas importantes los científicos no han encontrado las reglas adecuadas de aditivos. Algunos de los ejemplos más conocidos son el tono de los colores, la dureza de la materia o la temperatura fenomenológica. Lo más importante es que la velocidad, que en la era de Froude todavía se creía que era medible en una escala de relación, resulta violar la regla de los aditivos, y por lo tanto no tiene una estructura de relación. Llegaremos a la violación de las transformaciones galileas en la siguiente sección.

No todas estas observaciones son nuevas. Como señaló Carnap, las reglas para establecer mediciones, 'no son del todo convencionales. El conocimiento fáctico es necesario para decidir qué tipos de convenios pueden llevarse a cabo sin entrar en conflicto con los hechos de la naturaleza». [Carnap, 1995, p. 68]. En este artículo, se presume que el análisis de dimensiones clásicas y el teorema de "II-teorema" deban una gran parte de su importancia a la explotación de la estructura de la relación de estructuras que se utilizan. Es de esperar que futuras investigaciones revelen hasta dónde llega esta hipótesis.

4.2.2.- Similitud geométrica

Volvamos a la sección 3.2, donde aceptamos incuestionablemente que si aumentamos el lado de un acuario cúbico por un factor α, su volumen aumenta por el factor α^3. Ahora debemos hacer la siguiente pregunta. ¿Son estas leyes cuadradas y cúbicas ideas empíricas y tenemos que aplicar la inducción de la manera que tuvimos que hacer con la ley de Boyle, o son estas verdades matemáticas, que se pueden determinar sin investigaciones empíricas? A primera vista son, en efecto, conclusiones puramente matemáticas y, por lo tanto, analíticas, no basadas en hechos empíricos. Sin embargo, ¿podemos estar seguros de que si aumentamos los tres lados del acuario de un metro, a diez, su volumen aumenta en un factor de mil? Por supuesto, si nos fijamos sólo en las matemáticas de la pregunta, vemos que si el borde del antiguo acuario se ajusta diez veces el borde del nuevo, la superficie del suelo de este último consta de diez veces diez cubos y que el nuevo acuario permite diez capas de cien cubos, que hace mil cubos. Pero, ¿podemos estar seguros de que este tipo de escalado siempre coincidirá con lo que sucede en la realidad? La respuesta está en nuestra creencia de que la geometría euclidiana, que es puramente analítica, es aproximadamente cierta para el espacio físico.

Aquí, hemos llegado al centro de la discusión sobre la geometría pura y física y el convencionalismo (véase, por ejemplo, el [1945] de Carl Hempel). Sin entrar en los detalles de ese debate, consideremos algunas observaciones, que son importantes para nuestro debate actual.

En primer lugar, las leyes de escalado geométrico a las que sólo se hace referencia sólo se mantienen en términos de geometría euclidiana pura, pero fallan, por ejemplo, en geometría elíptica o Riemanniana. Si el radio de un casquillo de esfera se duplica, su área en la esfera no se cuadruplica como es el caso cuando duplicamos el radio de un círculo en un plano. En segundo lugar, si aplicamos las leyes de escalado geométrico (6) asumimos que el espacio físico, con fines de ingeniería, es euclidiana. En tercer lugar, la historia de la geometría no euclidiana nos ha enseñado que descubrir la estructura del espacio físico no es un asunto a priori y que no estamos obligados a utilizar la geometría euclidiana. Por último, una enorme cantidad de experiencia práctica a través de los siglos ha confirmado que para casi todos los propósitos de ingeniería y otros propósitos prácticos podemos asumir el espacio físico para ser euclidianos. Esta es la razón por la que estamos tan seguros de que, en realidad, los acuarios cúbicos se comportan de manera similar a los cubos en nuestro pensamiento euclidiano a priori. A la luz de todas estas observaciones, sólo podemos sacar una conclusión débil, pero sirve a nuestro modesto objetivo. Las observaciones muestran que las leyes de escalado geométrico (6) definitivamente introducen una cantidad considerable de contenido empírico. Sin embargo, en el mismo momento en que asumimos que la geometría euclidiana es cierta para el espacio físico, estas leyes se convierten en verdades analíticas.

Curiosamente, la suposición de relación-escala es mucho más débil que la suposición de que el espacio físico es euclidiano. La medibilidad de la relación de longitudes, áreas y volúmenes sólo implica la escalabilidad del equilibrio de, por ejemplo, volúmenes de un nivel de magnitud a otro nivel de magnitud. Claramente, las concatenaciones y los factores de escala utilizados no necesitan satisfacer las leyes de la geometría euclidiana. Para la posición en línea, podríamos medir la longitud en la escala de los pinzones de Ellis, donde un dinch es igual a una pulgada pero donde la concatenación se produce poniendo varillas en ángulo recto en lugar de rad, [1966, p. 80]. Por poner otro ejemplo, podríamos tomar la circunferencia de un cuadrado como la medida de su área; por lo que cuádruple su área en el sentido euclidiana sólo será equivalente a duplicarla en el sentido de la circunferencia. Sin embargo, si decidimos aceptar que la geometría euclidiana es verdadera para el espacio físico, las longitudes, las áreas y los volúmenes se vuelven medibles en una escala de relación. Sin embargo, si, como en la física moderna, abandonamos la suposición euclidiana, las cosas se vuelven menos transparentes. La curvatura del espacio posiblemente se añadirá a los factores relevantes y las mismas retenciones para las reglas de correspondencia, que conectan las entidades geométricas, como puntos y líneas, con aspectos del espacio físico. En cuanto a la contracción de Lorentz, las condiciones en las que se comparan la longitud y su unidad de medida se vuelven relevantes. (Incluso en física, la discusión sobre la relación entre las unidades de medida y la relatividad general continúa. Véase, por ejemplo, [Pervushin et al., 2004]) estas condiciones consideran circunstancias cinemáticas que nos lleva perfectamente a la siguiente sección

4.2.3 Semejanza cinemática y dinámica

Cuando nos dirigimos a las similitudes cinemáticas y dinámicas de la sección 3.3, vemos que la teoría de la escala se desarrolla de nuevo dentro de la mecánica clásica y el espacio físico euclidiano. Tomemos por ejemplo la escala de las velocidades. Según la teoría de la relatividad especial, la ampliación de las velocidades a través de la fórmula (7) nos desviará. Las transformaciones galileas sólo se aplican a velocidades bajas y no a velocidades comparables con la velocidad de la luz. Por mucho que intentemos, nunca podremos medir objetos que vayan más rápido que la velocidad de la luz (suponiendo que la relatividad especial sea verdadera). En consecuencia, la ley de escalado de velocidad (7) debe ser falsa, ya que permite velocidades superiores a la velocidad de la luz. Esta observación no pretende criticar la teoría del escalado de ingeniería porque, en la práctica, es muy poco probable que se produzcan efectos relativistas en la dinámica de fluidos. Es sólo para mostrar que la ley de escalado de velocidad tiene contenido empírico y no es analítico o a priori.

Si se considera de nuevo la sección 3.3, uno puede preguntarse si la ley modelo de Newton (10) es una ley analítica o empírica. Mientras que a primera vista las leyes de escala geométrica parecen analíticas, la ley modelo de Newton da la impresión de ser empírica. Esta impresión se amplifica cuando se lee la prueba de Newton. Sin embargo, aprendimos de la sección 3.3 que con respecto a las fuerzas de inercia la ley modelo de Newton sigue deductivamente de su ley de fuerza resultante (y la ley de Arquímedes). Por lo tanto, en el momento en que se acepta la segunda ley de Newton, su ley modelo sigue analíticamente sin necesidad de un mayor susto empírico. En la misma sección, vimos que los factores de escala inercial y de fuerza de presión son idénticos y, por lo tanto, que se cumplió una condición necesaria para escalar las fuerzas. Si hubieran sido diferentes, un equilibrio entre las fuerzas inerciales y de presión en una escala de modelo no habría estado en equilibrio en una escala de prototipo. (Interesantemente, Bridgman subraya el carácter necesario de los resultados del análisis de dimensiones, así como [1973, p. 52].) Incluso podemos fortalecer esta observación. De la suposición de la medibilidad de la relación-escala, se deduce que si, a un cierto nivel de escala, las fuerzas de inercia y presión están en equilibrio, entonces la escala lineal de ambas fuerzas será necesaria y suficiente para llegar al equilibrio de fuerzas en otro lugar en la escala.

A continuación, saquemos nuestras conclusiones. El factor de escala de fuerza inercial (8) se basa en las restricciones de escala derivadas de las tres leyes de la mecánica newtoniana (incluida la definición de densidad), en los principios de la geometría euclidiana con respecto a los volúmenes utilizados, y en el hecho de que todas las variables en estas leyes son medibles en una escala de relación. La ley modelo de Newton obtiene todo su contenido empírico de su ley de aceleración y no necesita ninguna prueba independiente. Si, esta forma de razonamiento forma la base para el análisis dimensional, también es un asunto para futuras investigaciones.

Aunque las leyes de escalado cinemática y dinámica definitivamente tienen contenido empírico, claramente, este contenido deriva deductivamente de la mecánica clásica, que asume la medibilidad a escala de relación, y la geometría euclidiana. Por lo tanto, estas leyes son analíticas, y a priori, en el sentido de que dentro del paradigma de la mecánica clásica no pueden ser falsas. En este sentido difieren sustancialmente de las leyes fenomenológicas como las leyes de Hooke, Boyle, etc.

4.2.4 Ley de similitud de Froude

Por fin pasemos al contenido empírico de la ley de similitud de Froude. Abordaremos el tema del contenido empírico argumentando con la mayor fuerza posible que la ley modelo de Froude tiene mucho más carácter analítico que una ley empírica, como por ejemplo, la ley de Boyle. Primero consideraremos la forma de estas dos leyes. En cuanto a la forma, pV = k difiere de (1), siendo el segundo una implicación, mientras que el primero es una igualdad. Sin embargo, esta diferencia sintáctica, no es importante, ya que podemos reescribir la ley de Boyle de la siguiente manera:

$$\text{(19)} \qquad \frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1} \rightarrow \frac{V_1}{V_3} = \frac{p_3}{p_1} \text{ for all } V_1, V_2, V_3, p_1, p_2, p_3$$

La ecuación (19) desactiva otros argumentos sobre la cuestión de por qué la ley de Boyle sería diferente de la ley modelo de Froude. La primera es que la ley de Froude se utiliza para predecir el comportamiento de prototipos, mientras que la ley de Boyle no lo es. Fórmula (19), sin embargo, muestra cómo la ley de Boyle se puede utilizar para predecir el comportamiento desconocido de V_3 y p_3 también. El segundo argumento es que la constante en la ley de Boyle es dimensional, mientras que Froude utilizó una constante sin dimensiones. Una vez más, (19) muestra que las leyes de Boyle pueden ser formuladas sin una constante dimensional.

Desde una perspectiva metodológica, otro argumento favorece la similitud entre ambas leyes. Recordemos cómo Froude verificó la fiabilidad de su método de extrapolación. En primer lugar, Froude formuló su ley modelo utilizando experimentos modelo sin referencia a números sin dimensiones para predecir el comportamiento del prototipo. Después, verificó sus predicciones remolcando el prototipo a escala completa y midiendo su arrastre. Estos fueron los exitosos experimentos de H.M.S. Greyhound, que convencieron al mundo de la viabilidad de su enfoque. Así, aplicó el método científico de verificación de predicciones, que primero se dedujo de la teoría. Al establecer su conocida ley, Boyle aplicó el mismo método. Este relato de la ley modelo de Froude plantea una cuestión relativa a la utilidad de probar una ley analítica. Volveremos a esta pregunta en un momento. En primer lugar, volvamos a la ecuación (19) y reescribamos la ley modelo de Froude de la siguiente manera:

$$\text{(20)} \qquad \frac{V_p^2}{V_m^2} = \frac{L_p}{L_m} \rightarrow \frac{D_p}{D_m} = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^3 \text{ for all } V_p^2, V_m^2, L_p, L_m, D_p, D_m.$$

En esta ecuación D_p y D_m son la resistencia de creación de ondas respectiva según el prototipo y el modelo. Por cierto, aunque en sus escritos Froude no utilizó números dimensionales, (20) muestra que su condición de escala o la de Reech, es ampliamente equivalente a la restricción de la igualdad de número de Froude a nivel de modelo y escala. Después de todo, el antecedente de (20) es equivalente a:

$$\frac{V_p^2}{gL_p} = \frac{V_m^2}{gL_m}$$

Reformulada como en (19) y (20), las leyes de Boyle y Froude tienen formas matemáticas similares.

La diferencia en el carácter empírico viene mucho más claramente a la primera línea si consideramos las fórmulas en combinación con las cláusulas ceteris paribus. Lo más importante es que para la fórmula (19) el objeto debe ser la misma cantidad de gas (sin adiciones, restas o condensaciones), y el gas debe permanecer a la misma temperatura. Otra suposición es que la presión y el volumen son cantidades físicas extensas, medibles en una escala de relación. Además, los volúmenes no deben llegar a ser demasiado pequeños o las presiones demasiado altas, ya que entonces la ley comenzará a desviarse de la realidad. Por último, el gas debe estar protegido de todas las demás influencias perturbadoras externas. Para la ley de Froude, las importantes cláusulas ceteris paribus prescriben similitud geométrica entre modelo y prototipo. Un segundo factor es la suposición de que la resistencia causada por la creación de ondas es una cantidad física extensa, una fuerza, que puede estar en equilibrio con otras fuerzas y se puede medir en una escala de relación. Otra consideración es que la similitud entre los patrones de onda alrededor del modelo y alrededor del prototipo se debe al antecedente de la ley y que la creación de ondas es, con mucho, la parte más importante de D_p. Además, se supone que la escala de los volúmenes fluidos se adhiere a las reglas euclidianas, lo que significa que escalan volúmenes de acuerdo con la ley de cubos. Por último, se supone que el modelo y el prototipo deben estar protegidos de todas las demás influencias perturbadoras externas.

Si tenemos en cuenta estas cláusulas, la diferencia entre las dos leyes fenomenológicas se hace evidente. La cláusula ceteris paribus de la ley de Boyle parece, al menos en principio, admitir la posibilidad de que lo que conseguirá sea falso, mientras que el antecedente es cierto. Sólo si añadimos leyes y teorías adicionales a las cláusulas ceteris paribus, esta posibilidad parece desaparecer. Sin embargo, si se aplican las cláusulas ceteris paribus de la ley modelo de Froude, la verdad del antecedente implica la verdad de lo consecuente. Esto se debe principalmente a la ley que los volúmenes y por lo tanto los pesos aumentan con el cubo del factor de escala lineal, que deductivamente sigue de la geometría euclidiana y de la noción de densidad. Desde esta perspectiva, es comprensible que Reech llegara a la ley modelo de Froude, antes de Froude, sin haber llevado a cabo experimentos en la misma línea que Boyle. Además, la ley modelo de Froude a menudo se denomina «criterio de semejanza de Froude», que también insinúa su pequeña cantidad de contenido empírico.

Aun así, el lector podría preguntar, ¿por qué Froude llevó a cabo su experimento de H.M.S. Greyhound si su ley modelo era sólo una tautología? La respuesta a esta pregunta tiene al menos dos partes. En primer lugar, su ley modelo sólo se vuelve analítica si todas las cláusulas ceteris paribus son ciertas. En segundo lugar, llevó a cabo sus experimentos para demostrar que su método de extrapolación era fiable y no verificar su ley modelo, que es muy difícil de negar, una vez que las cláusulas ceteris paribus son ciertas.

No repetiremos nuestro argumento sobre por qué la suposición de arrastre que se puede medir en una escala de relación permitió a Reech y Froude transferir el equilibrio de un nivel en la escala a otro. El argumento es similar al que se da en el caso de la ley modelo de Newton. La suposición de que la fuerza es medible a escala de relación es de suma importancia para el método de extrapolación de Froude. Recuerde que Froude separó la resistencia a la fricción de las otras causas de fricción, la más importante de las cuales era la creación de ondas y que las extrapoló de manera muy diferente. La resistencia a la fricción se calculó utilizando la fórmula de arrastre, cuyo coeficiente de arrastre, hoy en día, se calcula utilizando el número Reynolds. Sin embargo, la resistencia a la creación de ondas no puede calcularse y, por lo tanto, se escala utilizando la ley modelo de Froude. Es la regla de los aditivos, el segundo de los tres axiomas utilizados para definir las escalas de relación, lo que permite la separación de las dos fuerzas en el nivel del modelo y su superposición en el nivel de prototipo. Una vez más nos encontramos con la importancia de la suposición de la escala de la relación con las características físicas que se están considerando. Por lo tanto, en resumen, podemos concluir que, desde un punto de vista sistemático, las prácticas de escalado de Froude se basaron teóricamente en:

• Geometría euclidiana (si el modelo y el prototipo son geométricamente similares, el aumento de los volúmenes de agua responsables de la resistencia a la fabricación de ondas se procederá de acuerdo con el cubo del factor de escala lineal),

• Mecánica newtoniana (varios factores de escala; posible derivación de la ley de escalado, ley de

•La suposición empírica de la medibilidad de la relación-escala (equilibrio de las propiedades en realidad es escalable a cualquier nivel; superposición de la fracción de la piel y resistencia a la creación de ondas para el modelo y el prototipo).

Mostramos que estos tres factores establecen un relato epistemológicamente adecuado de la metodología de escalado de Froude sin referencia a números sin dimensiones. En general, las conclusiones sobre el contenido empírico de las leyes geométricas, cinemáticas, dinámicas e incluso de escala de Froude son comparables. Sin duda todas estas leyes definitivamente tienen contenido empírico, pero no en la forma en que lo hacen las leyes fenomenológicas estándar. Las leyes de escalado derivan todo su contenido deductivamente de la mecánica clásica, la geometría euclidiana y la suposición de medibilidad a escala de relación. Por lo tanto, estas leyes son analíticas, y a priori, en el sentido de que, a diferencia de las leyes fenomenológicas estándar, no pueden ser falsas en el contexto de la mecánica clásica. Terminaremos esta sección haciendo algunas observaciones sobre la relación entre la escala y la teoría de la medición.

4.3 Relación con la teoría de la medición

Los temas de la presente sección sobre el carácter de los criterios de similitud están relacionados con al menos tres áreas de investigación: análisis dimensional, teoría de medición matemática y la metodología o epistemología de la ingeniería. La literatura muestra que las investigaciones no están tan estrechamente relacionadas como cabría esperar a primera vista. Los investigadores de teoría de la medición ya han formulado y abordado algunos de los problemas que conectan la teoría de la escala y la medición. R. Luce, por ejemplo, menciona la incompleta presentación del análisis dimensional en la teoría de la representación estándar de la medición, [1996, Secta 4.8]. Está incompleta, deriva de la falta de una explicación convincente de por qué las leyes genuinas de la física deben completar el principio de la invariancia dimensional. Narens abordó este problema desde un punto de vista fundamental en [2002].

En [2007, p. 143] Narens distingue entre los fundamentos matemáticos y epistemológicos del análisis dimensional. Aunque muchos autores ya han considerado los fundamentos matemáticos del análisis dimensional, aún queda mucho por hacer con respecto a los fundamentos epistemológicos. Según Narens, por ejemplo, un aspecto importante de estos fundamentos epistemológicos se refiere a la relación entre la definición en la ciencia y la invariancia de la simetría, donde una simetría es un isomorfismo de una estructura relacional sobre sí misma. Sin embargo, todavía falta una base epistemológica completa generalmente aceptada del análisis dimensional. Nos encontramos, por ejemplo, con la cuestión de la relación entre el análisis dimensional y la geometría euclidiana, y la pregunta de si la medibilidad de la relación-escala es una condición necesaria para el teorema. Esta última cuestión ya se ha abordado en la teoría de la medición: «el análisis dimensional puede ampliarse para incorporar cualquier estructura que tenga una representación de la escala de relación y que se distribuya en una estructura conjunta adecuada», [Luce, 1996, p. 92]. Sin embargo, las aplicaciones de estos resultados y un análisis epistémico de los mismos siguen ausentes. Tampoco el caso de la velocidad relativista ha pasado desapercibido en la teoría de la medición. El enfoque estándar en la teoría de la medición puede hacer frente a la mayoría de las estructuras en la física clásica, pero no cubre, por ejemplo, la velocidad relativista. Según Luce, este tema merece más investigación dentro de la teoría de la medición [1996, p. 92]. Desafortunadamente, en el presente capítulo, tuvimos que dejar intactas muchas preguntas relacionadas con las relaciones entre la geometría euclidiana, el análisis dimensional y las escalas de relación y sus unidades. Dado que nuestro tema es una investigación ascendente sobre la metodología de escalado en ingeniería, habíamos desechado la teoría matemática de la perspectiva de medición sobre estas preguntas. Un tema tentador sobre la filosofía de la agenda de investigación de ingeniería es, por lo tanto: estudiar y cerrar la brecha entre la teoría de la medición, la metodología de ingeniería en general y las prácticas más específicas del análisis dimensional. Luce está de acuerdo; según él, todavía queda mucho trabajo por hacer antes de que los conocimientos matemáticos sobre medición puedan ser puestos en la práctica científica [1996, p. 79].

5 CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

La escala de los artefactos ha sido un problema importante a lo largo de los siglos y para ello se han desarrollado varias metodologías de escalado. Uno de estos métodos implica el uso de modelos de escala sin utilizar explícitamente números sin dimensiones. A finales del siglo XIX, científicos e ingenieros comenzaron a desarrollar análisis dimensionales para adoptar números sin dimensiones. La introducción del número Froude y Reynolds a la versión sin dimensiones de la ecuación Navier-Stokes significó que el análisis de dimensiones podría ayudar a cerrar la notable brecha entre la teoría y la práctica en la dinámica de fluidos. La combinación de modelado de escala según el análisis dimensional se ha convertido en uno de los instrumentos de escalado más importantes de la ingeniería moderna.

En ingeniería, la investigación directa se distingue de la investigación indirecta, que se basa en modelos matemáticos y a escala. En muchos contextos técnicos, la investigación directa o a escala real, ¿a menudo es difícil de lograr por razones prácticas como el costo y la seguridad? Su ventaja reside en la validez de los métodos ya que sus resultados son más fiables que los obtenidos a partir de la investigación indirecta. Dado que la investigación indirecta se lleva a cabo utilizando modelos de escala o informáticos, la desventaja radica en la incertidumbre de su validez. Sin embargo, su principal activo, es que los modelos a escala o los modelos informáticos son a menudo mucho más manejables y más fácilmente accesibles que el artefacto o proceso real, y los experimentos están mejor controlados.

Vimos que las observaciones de Sterrett sobre el carácter especial de los modelos a escala definitivamente se mantienen para los modelos a escala de Froude. Sobre el tema del argumento de la misma física llegamos a la conclusión de que la física de los modelos a escala en la arquitectura naval es del mismo orden de complejidad física que la del prototipo. Además, la ley de arrastre de Newton puede aplicarse en ambas situaciones, porque no hay restricciones en el tamaño de los objetos considerados; esto todavía forma la base de los cálculos de fricción de la piel en los experimentos de tanques de remolque de hoy. Tampoco pueden considerarse los modelos a escala de Froude como intermediarios entre la teoría y las observaciones. A diferencia de un modelo de moléculas de bola y palo, un modelo a escala es una parte genuina de los fenómenos empíricos que se deben estudiar. Finalmente, Froude no utilizó las ecuaciones fundamentales subyacentes; no se refirió a las ecuaciones de Navier-Stokes.

Con respecto al contenido empírico de los métodos de modelo de escala, vimos que Froude trabajaba dentro del paradigma de la mecánica clásica. Utilizó la geometría euclidiana, la mecánica newtoniana y la estructura de las mediciones de la escala de la relación para llegar a su metodología de extrapolación. En general, las conclusiones sobre el contenido empírico de lo geométrico, lo cinemático y lo dinámico, e incluso las leyes de escalado de Froude son muy similares. Sin duda todas estas leyes tienen contenido empírico, pero no en la forma en que las leyes fenomenológicas en la física lo hacen. Las leyes de escalado derivan todo su contenido empírico deductivamente de la mecánica clásica, incluida la geometría euclidiana y la medibilidad de la relación-escala de las propiedades relevantes. Estas leyes son, por lo tanto, analíticas y a priori, en el sentido de que, a diferencia de las leyes fenomenológicas estándar, no pueden ser falsas en el contexto de la mecánica clásica. Curiosamente, el método de extrapolación de Froude, cuando se utiliza como instrumento para la predicción, no es analítico en el sentido de que su precisión para fines prácticos tiene que ser probada empíricamente.

Por último, vimos que la suposición de medibilidad a escala de relación contiene un contenido empírico considerable. Se supone que cualquier equilibrio en la realidad se puede escalar linealmente hacia arriba o hacia abajo a cualquier otro equilibrio. La metodología de escalado de Froude debe parte de su virtud, a la explotación de la suposición (implícita) que indica que las escalas consideradas tienen una estructura de escala de relación. Por lo tanto, una pregunta interesante es extender esta conclusión y preguntar si el análisis de la dimensión clásica, y por lo tanto el teorema de la palabra, también deben sus puntos fuertes a la suposición de la relación-escala. Queda por ver si las conclusiones sobre la geometría euclidiana y la mecánica clásica dibujadas en la sección anterior también pueden extenderse al análisis de dimensiones estándar. Si es así, surge una pregunta sobre los fundamentos filosóficos del análisis de dimensiones o, en ese caso, la escala, cuando no se supone que existan escalas de relación. Por último, otra cuestión importante para futuras investigaciones se refiere a los fundamentos del análisis dimensional externo a la mecánica clásica. Este análisis podría tener en cuenta, por ejemplo, los efectos relativistas.

CAPITULO VII

SIMILITUD Y ANÁLISIS DIMENSIONAL

Por Susan G. Sterrett

1 INTRODUCCIÓN Y VISIÓN GENERAL

La importancia de la similitud en la comprensión de las cosas y el razonamiento sobre ellas fue reconocida antes de la época de Platón. La similitud sigue siendo importante en filosofía, ciencia y tecnología hasta el día de hoy. Las raíces históricas de los conceptos de similitud, relación y proporción recibirán una breve mención en este artículo con el fin de proporcionar una comprensión más completa de la relación entre los parámetros sin dimensiones y el razonamiento de la similitud. Sin embargo, el tema principal de este artículo, es el uso del análisis dimensional en el razonamiento basado en la similitud en los contextos actuales.

1.1.- Relaciones y similitud

El uso de relaciones en el razonamiento de la similitud tiene una larga historia. Los Pitagóricos, una comunidad intelectual anterior a la Academia de Platón, discernieron una relación entre fenómenos observables y proporciones. Ciertos fenómenos musicales se correlacionaron con proporciones de longitudes de porciones sin restricciones de una cuerda de lira; estas proporciones eran iguales a las proporciones de los primeros números de conteo. Este descubrimiento les pareció una buena razón para esperar que todos los fenómenos físicos pudieran ser en última instancia contabilizados o descritos en términos de relaciones de números enteros. Las proporciones que surgieron en el estudio de la armonía aparecieron en otras representaciones matemáticas importantes, como las tetractys, una disposición triangular de diez marcas compuesta por cuatro filas que contenían una, dos, tres y cuatro marcas, respectivamente.

Muchos otros números tenían formas geométricas estrechamente asociadas con ellos. Esto se debió al uso de matrices bidimensionales de marcas que representaban números enteros, que se generaron utilizando un determinado procedimiento estándar. Por lo tanto, había una representación gráfica canónica para cada número generado, utilizando el procedimiento. Las relaciones entre los lados de la matriz (es decir, los lados del cuadrado o rectángulo formado por la matriz) también fueron investigadas y asociadas con números particulares. Por lo tanto, el estudio de la similitud geométrica se asoció al principio con proporciones de números b enteros. El ejemplo más simple de esto fue que los arreglos para todos los "números cuadrados" (los números 4, 9, 16,... , que tenían una relación de lados de 2:2, 3:3, 4:4, ... respectivamente) eran todos cuadrados (y tan geométricamente similares) [McKirahan, 1994,Capítulo 9].

Ese razonamiento de la similitud geométrica que implica relación y proporción se refleja más tarde en la geometría de Euclides, aunque allí las proporciones se consideran principalmente como proporciones de segmentos de línea per se, en lugar de como proporciones de números. Muchas pruebas en la Geometría de Euclides emplean la estrategia de establecer que dos figuras son similares con el fin de extraer inferencias sobre otras entidades geométricas. Tales pruebas, o partes de pruebas, generalmente proceden mediante la identificación de ciertas proporciones de líneas y, a continuación, el establecimiento de la similitud de las cifras mediante proporciones. Las proporciones son declaraciones de que dos relaciones son iguales. Un ejemplo es una declaración de que la relación de dos longitudes x e y en una figura geométrica A es igual a la relación de las dos longitudes correspondientes x’ y y’ en otra figura geométrica B, que se puede poner como: x es a y como x’ es a y’ , o, en una notación familiar, como x : y :: x’: y’.(La igualdad de ángulos es necesaria para la similitud geométrica, pero en la medida en que la igualdad de ángulos se basa en establecer la similitud de triángulos rectos, algunos de los cuales pueden ser construidos sólo para este supuesto, la igualdad de ángulos es un ejemplo de establecer la similitud de las figuras geométricas por medio de la proporción también.) Una vez establecida la similitud de dos figuras geométricas (como triángulos similares o paralelogramos similares), se sabe que se poseen otras igualdades entre las relaciones, de las que se pueden dibujar.

Hay una concepción más formal de la similitud geométrica. La similitud geométrica en un espacio métrico se puede definir en términos de la métrica definida en el espacio y una asignación entre los puntos correspondientes de las dos figuras geométricas similares: la distancia entre dos puntos m y n en la figura geométrica A es igual a alguna constante veces la distancia entre los puntos correspondientes m’ y n’ en la figura geométrica B. (teniendo formalmente, la condición es: g(m, n) = rg(m’, n’), donde g es una métrica, "). r es alguna constante numérica m’, y n’ puntos en la figura B tal que son las imágenes de los puntos m y n en la figura A asignado a la figura B.). (Métrica se define en un conjunto. El conjunto junto con la métrica constituye un espacio métrico. Una métrica se define de la siguiente manera. Si X es un conjunto arbitrario, una función g: X - X → R en X es una métrica en X si cumple las siguientes condiciones para todos los x, y, z en X: **1**. g(x, y) es mayor o igual a 0 (pensado como una función de distancia, "distancias" no son negativas); **2**. g(x, y) = 0 si y sólo si y sólo si y x = y (es decir, considerado como una función de distancia, sólo la "distancia" entre un elemento y sí mismo es cero); **3**. La función g(x, y) es simétrica, es decir, g(x, y) = g(y, x) (la "distancia" entre x e y es la misma que la distancia entre y y x); y **4**. La función (x, y) satisface la desigualdad g(x, y)+g(y, z) ≥ g(x, z) (la "desigualdad de triángulos”) Para el caso especial de la geometría euclidiana donde g es la distancia en su sentido habitual, r sería el factor de escala entre dos figuras geométricamente similares A y B. Cada par de figuras cuya similitud se establece utilizando proporciones en la geometría euclidiana también saldrán como geométricamente similares en esta concepción.

1.2. Similitud física

¿Se puede generalizar la noción de similitud desarrollada en geometría desde la geometría hasta la ciencia natural? La respuesta es sí. Es común considerar la noción de similitud física como una generalización de este tipo; para generalizar la noción de similitud de la geometría a la ciencia natural, tanto la noción de relación como la noción de forma deben generalizarse. La forma correcta de llevar a cabo tal generalización de la similitud geométrica es generalizar desde la similitud de las figuras geométricas a la similitud de los sistemas físicos. (Peter Kroes [1989] ha instado a que las analogías entre sistemas en lugar de leyes sean importantes. Creo que la pregunta ha recibido muy poca atención entre quienes escriben sobre la similitud en la filosofía de la ciencia.) La noción de sistemas similares se remonta al menos a Newton, que usó la frase él mismo. Algunas versiones menos formales de la idea se encuentran en Galileo. La declaración formal de la noción de sistemas similares como se utiliza hoy en día no apareció en la literatura en inglés hasta principios del siglo XX.

En lugar de las relaciones restringidas para implicar sólo longitudes (de segmentos de línea), la similitud de los sistemas físicos se establece utilizando relaciones que también implican otras cantidades, como el tiempo, la masa y la fuerza. Como se explicará más adelante, las cantidades se organizan en un sistema y se asocian con un sistema de dimensiones. Hay algunas limitaciones en un sistema de este tipo: las cantidades físicas del mismo tipo tienen la misma dimensión y cualquier cantidad puede expresarse en términos de las dimensiones del conjunto de cantidades designadas, como el conjunto de cantidades base. Las proporciones utilizadas para establecer la similitud física no tienen dimensiones, del mismo modo que las proporciones relevantes para establecer la similitud geométrica. Pueden ser tan simples como una proporción de dos cantidades de la misma dimensión (como número Mach, que es una relación de dos velocidades) o significativamente más complejas (como el número de Reynolds, que contiene densidad, velocidad, longitud y viscosidad cinemática). Se conocen como parámetros sin dimensiones, o grupos sin dimensiones, y muchos han recibido nombres propios debido a su utilidad en la ciencia y la ingeniería.

La generalización de la similitud geométrica con la similitud física no es trivial, ya que la noción de forma se generaliza desde la forma de una figura geométrica hasta la configuración de un sistema físico. La identificación de un sistema físico adecuado puede requerir conocimientos empíricos prácticos y la aplicación de principios fundamentales, y las cantidades físicas implicadas deben identificarse con un comportamiento de interés o fenómeno de interés. Hay diferentes especies de similitud física. A menudo, una determinada especie de similitud se identifica con un parámetro sin dimensiones en particular. Existe una progresión de la similitud física de la similitud geométrica (similitud de las relaciones lineales, es decir, traza trayectorias similares en tiempos proporcionales) a la similitud cinemática (similitud geométrica más similitud de movimientos, es decir, los mismos caminos y entre las velocidades), a la similitud dinámica (similitud cinemática más las mismas relaciones entre fuerzas). Todos estos surgen en la hidrodinámica, y se discuten con más detalle en el capítulo 6 de esta compilación. Sin embargo, hay otros tipos de similitud física que se utilizan para las pruebas de modelos experimentales: escritura en 1964, Pankhurst (Pankhurst, 1964, p. 18 y pp. 77-80]. (Pankhurst fue Superintendente de la División de Aerodinámica del Laboratorio Físico Nacional desde 1964 hasta 1970.)) Similitud elástica enumerada, similitud de distribución de masa, similitud eléctrica, similitud magnética y similitud térmica entre los tipos de similitud entre el modelo y el prototipo. Más recientemente, se han desarrollado parámetros sin dimensiones para la similitud física con respecto a los fenómenos en la ingeniería química y el modelado de incendios [Slokarnik, 2006; Becker, 1976; Hottel, 1961; Sterrett, 2006].

1.3- Similitud física y parámetros sin dimensiones

La generalización de la similitud geométrica con la similitud física no fue obra de un solo pensador, y tomó algún tiempo para que se desarrollara en su forma actual. Ahora, más de dos milenios después de Pitágoras, el método de similitud física es un método maduro y bien establecido utilizado en la física, la ingeniería y algunas ciencias aplicadas. El método comenzó en el Renacimiento, pero no fue desarrollado y formalizado a finales del siglo XIX y principios del XX. Edgar Buckingham de la Oficina Nacional de Normas estableció el método en uso a partir de 1914 explícitamente, aunque el desarrollo del método se debió a otros, y más tarde se hizo más riguroso matemáticamente. (Ehrenfest-Afanassjewa [1916] proporcionó conceptos más rigurosos matemáticamente (los conceptos de funciones homogéneas y ecuaciones homogéneas), que J. Palacios [1964, p. 48 -53] empleó para presentar una formalización más rigurosa de los conceptos y ecuaciones homogéneas, suposiciones involucradas en la obtención de una versión del resultado de Buckingham. Langhaar [1951] también contiene un tratamiento matemáticamente riguroso del análisis dimensional y la similitud. Sin embargo, la declaración original de Buckingham ha mantenido su prominencia y es generalmente la citada en la literatura de ingeniería.) Su artículo de 1914 "en Sistemas físicos similares: Ilustraciones del uso de ecuaciones dimensionales " [Buckingham, 1914] se ha convertido en una referencia histórica, y el teorema que contiene con respecto a la reducción de una relación entre las cantidades físicas, con una relación entre los parámetros sin dimensiones, que se pueden utilizar para establecer la similitud física, se ha convertido en el ampliamente conocido Teorema de Buckingham (a pesar de sus propias observaciones en documentos posteriores que ceden crédito por prioridad a Riabouchinsky) [Sterrett 2005,p. 188]. Sin embargo, algunas de las ideas del periódico de Buckingham aparecieron mucho antes, en particular en Francia por Vaschy [Vaschy 1892] y en el contexto de un problema práctico en aerodinámica de Helmholtz.

Otro punto, menos celebrado, en el artículo de Buckingham de 1914 es que, incluso después de considerar todas las limitaciones lógicas y matemáticas, a menudo todavía queda cierto margen de maniobra a la hora de elegir qué parámetros sin dimensiones utilizar, para caracterizar un sistema físico dado y para establecer la similitud física de un modelo prototipo con el sistema que está destinado a modelar. Aquí se trata de una conceptualización adicional de la situación y del conocimiento empírico, lo que plantea cuestiones filosóficas sobre la interrelación de las matemáticas, la lógica, la ciencia natural, la ciencia aplicada y la ciencia de la ingeniería. (La relación entre la ciencia pura y la ingeniería con respecto a las ideas que implican similitud y análisis dimensional en los años previos e inmediatamente después del artículo de Buckingham de 1914 se discute en [Sterrett, 2005])

En este artículo estamos interesados en parámetros sin dimensiones y análisis dimensional en la medida en que se basan en la identificación y razonamiento sobre sistemas físicamente similares, pero es digno de mención que el análisis dimensional a menudo se ha discutido aparte de su uso, en establecer la similitud de los sistemas físicos. El análisis dimensional no sólo se discutió como un tema filosófico por separado del tema de similitud durante el siglo XX, sino que la similitud se discutió en la filosofía e, incluso, por algunos en la filosofía de la ciencia, por separado del uso de ecuaciones dimensionales y parámetros sin dimensiones.

Autores de obras de filosofía y filosofía de la ciencia en el siglo XX que escribieron sobre la similitud a menudo lo hicieron sin mencionar la teoría de las dimensiones o las proporciones sin dimensiones. Se llevaron a cabo algunas investigaciones formales sobre los temas de análisis dimensional y similitud física en la filosofía de la ciencia [Krantz, 1971, p. 454-

544], pero el trabajo no fue muy bien asimilado a la filosofía. A menudo, lo que para los filósofos significan por similitud es simplemente compartir una propiedad, como el rojo; o que el tono de rojo de un objeto está muy cerca de la sombra de rojo de otro. El filósofo de la ciencia Giere da como ejemplo de "explotar las similitudes entre un modelo y ese aspecto del mundo que se está utilizando para representar" el ejemplo de un modelo matemático de un péndulo en términos de similitudes: un científico elige "algunos características específicas del modelo, que luego se afirma que son similares a las características del sistema real designado a algunos grados de ajuste (tal vez bastante indicados libremente) "[Giere, 2004, p. 745]. Eso no es exactamente lo que se entiende por similitud en este artículo, a menos que la "característica" se generalice de la manera que se indica a continuación, es decir, como el valor de uno o más de los parámetros sin dimensiones que caracterizan un sistema.

En este artículo, la similitud se refiere a una noción generalizada de similitud geométrica. En esa noción de similitud, la similitud es una cuestión de proporción, en lugar de tener alguna característica específica en común. La noción de similitud que usamos aquí (similitud física de sistemas) podría ser de interés para aquellos que sí discuten la similitud en la filosofía. A menudo se oye decir que "cualquier cosa es similar a cualquier otra cosa en innumerables aspectos" [Giere, 2004,p. 747], y muchos filósofos consideran así establecer la similitud como involucrar poco más que elegir y elegir características para adaptarse a un propósito pragmático, en lugar de ser una noción formal capaz de proporcionar un rico recurso para investigaciones. Goodman enunciaba tal posición hace mucho tiempo [Goodman, 1972, p. 446], otorgando que las declaraciones de similitud" todavía son útiles en las calles ", pero "no se puede confiar en el estudio del filósofo". Porque, concluyó, "Como ocurre en la filosofía, la similitud tiende a ser analizada por completo o a requerir para su explicación justo lo que pretende explicar".

La actitud predominante en cuanto a la similitud "como ocurre en la filosofía" está por lo tanto algo en contradicción con la de los campos científicos, dado que i) el concepto de similitud geométrica es un recurso rico en la disciplina de la geometría, (ii) el concepto de similitud física, aunque incluir más de un elemento empírico que la similitud geométrica y, por lo tanto, requerir conocimientos más empíricos para ser utilizados eficazmente, es sin embargo un método ampliamente utilizado, indispensable y muy apreciado en el hombre y las ciencias de la ingeniería, y iii) el valor de la perspectiva de que la noción de similitud física podría generalizarse aún más. Por lo tanto, los debates contemporáneos en filosofía y filosofía de la ciencia podrían enriquecerse teniendo en cuenta la relación entre la similitud física y el análisis dimensional en la ciencia. Muchos tratamientos de similitud en la filosofía de la ciencia ni siquiera asocian el razonamiento sobre la similitud con la relación y la proporción. Se espera que, además de servir como referencia sobre el tema, este artículo pueda contribuir a rectificar esa situación.

La discusión en este artículo se centra en la relación entre la similitud y el análisis dimensional, y algunas de las cuestiones filosóficas involucradas en la comprensión y el uso de esa relación. Dado que la conexión entre la similitud y el análisis dimensional es a través de parámetros sin dimensiones, comenzamos con conceptos básicos sobre cantidades, unidades y dimensiones.

2.- CANTIDADES, UNIDADES Y DIMENSIONES

2.1.- Cantidades, unidades y ecuaciones de cantidad

Una ciencia como la física implica el uso de ecuaciones o relaciones de proporcionalidad para describir fenómenos físicos. Las ecuaciones y relaciones en las ciencias físicas relacionan cantidades físicas entre sí. Esto es así, ya sea que se expresen en palabras o en fórmulas simbólicas.

¿Qué se entiende exactamente por una cantidad en este contexto? Aquí se han adoptado diferentes enfoques.

Un enfoque del concepto de cantidad enfatiza que las cantidades físicas que aparecen en las ecuaciones físicas deben ser medibles, y de modo que el valor de una cantidad (por ejemplo, "seis pies") consta de dos porciones: una porción numérica y una unidad a la que todas las cantidades de ese tipo se pueden comparar. Maxwell discutió explícitamente esta concepción de una cantidad, al tiempo que recogía ambigüedades en la notación de cantidades físicas como se utiliza en las ecuaciones en la práctica científica. Señaló que los símbolos utilizados como variables en las ecuaciones de la física se prestaban a dos interpretaciones diferentes:

i) como denotando las líneas, las masas, los tiempos, etc., y
ii) como denotar sólo el valor numérico de la cantidad correspondiente, al unidad de hormigón a la que se refiere siendo entendido tácitamente [Maxwell 1890, p. 241].

Sin embargo, cada una de estas interpretaciones presenta un problema: La primera interpretación no se aplica realmente durante el proceso de realización de los cálculos numéricos. (Esto se debe a que, debido a las cantidades que Maxwell estaba utilizando, las operaciones aritméticas se aplican a los números, no a las propias cantidades.) La segunda interpretación no satisface el requisito de que "cada término [de una ecuación de física] tiene que ser interpretado en un sentido físico". La forma de Maxwell de resolver la ambigüedad que identificó fue adoptar una especie de enfoque híbrido. Durante el proceso de cálculo, dijo, debemos considerar los símbolos escritos como cantidades numéricas; se rigen en consecuencia por las reglas de las operaciones aritméticas. Sin embargo, no pudo prescindir completamente de la primera interpretación; escribió que "... en las ecuaciones originales y las ecuaciones finales, en las que cada término tiene que ser interpretado en un sentido físico, debemos convertir cada cantidad numérica en una cantidad concreta… Por conversión en una cantidad concreta", Maxwell significó multiplicar lo numérico de la expresión por "la unidad para ese tipo de cantidad" [Maxwell 1890, p. 241].

Un enfoque alternativo del concepto de cantidad es considerar las operaciones de multiplicación y división como aplicables a lo que Maxwell consideraba como cantidades concretas. En este punto de vista, las ecuaciones de la física pueden considerarse como una expresión de relaciones entre cantidades físicas, y no hay necesidad de un paso adicional de interpretación de los términos en la ecuación para producir cantidades físicas. Este enfoque alternativo es el que se favorece aquí. No queriendo el enfoque en el que se considera que una cantidad consiste en una porción numérica y una unidad, en este enfoque alternativo se puede pensar en una cantidad independientemente de la referencia de una unidad. Por poner un ejemplo, se considera que la definición de la velocidad de cantidad en términos de longitud y tiempo indica una relación entre cantidades concretas, sin implicar unidades o expresiones numéricas. Se considera que la relación V a l/t (la velocidad es proporcional a la longitud e inversamente proporcional al tiempo) expresa la relación entre la velocidad de la cantidad concreta, una longitud concreta y un tiempo concreto, sin una cobertura y con respecto a la aplicabilidad de las operaciones aritméticas de multiplicación y división a cantidades concretas. Lodge (Cornelius [1965a] acredita a Lodge como el primero en respaldar un cálculo de cantidades. Lodge lo hizo un artículo de 1888 en Nature, titulado "La multiplicación y división de las cantidades de hormigón" [Lodge 1888]. Cabe señalar que existía un cálculo de las cantidades para las cantidades de longitud, área y volumen en geometría euclidiana antes del papel de Lodge de 1888.) Argumentó para el reconocimiento de ecuaciones fundamentales de la mecánica y la física como ecuaciones cuantitativas, es decir, ecuaciones que "expresan relaciones entre cantidades" [Lodge 1888, págs. 281–283].

Entendidas como ecuaciones cuantitativas, las ecuaciones fundamentales de una ciencia "son independientes del modo de medición de tales cantidades; por mucho que se pueda decir que dos longitudes son iguales sin preguntar si se van a medir en pies o metros; y, de hecho, aunque uno puede medirse en pies y el otro en metros" [Lodge 1888, p. 281].

Lodge propuso que las operaciones aritméticas de multiplicación y división se aplicaran a cantidades concretas de diferentes tipos. En las ecuaciones cuantitativas, dijo, cuando las cantidades están representadas por números o expresiones numéricas, "ese número es la relación de la cantidad a algún estándar del mismo tipo [de cantidad]". Lodge hizo algunos puntos importantes sobre las ecuaciones cuantitativas que las distinguieron de las ecuaciones numéricas (que él consideraba derivadas de las ecuaciones cuantitativas). Ecuaciones físicas (cantidad) "sólo pueden estar entre cantidades del mismo tipo, o ... si hay cantidades de diferentes tipos en la ecuación, entonces la ecuación se compone realmente de dos o más ecuaciones independientes que deben ser satisfechas por separado, cada una de ellas es sólo entre cantidades del mismo tipo." También se refirió a las dimensiones de una cantidad, señalando que las dimensiones de una cantidad no siempre pueden determinar el tipo de cantidad que es. Los ejemplos que dio fueron de dos cantidades concretas diferentes que tenían la misma dimensión, como el trabajo y el momento de una fuerza. La importancia de mantener una distinción entre dimensiones y tipos de cantidades se considerará con más detalle a continuación.

La mención de la relación de una cantidad a un estándar del mismo tipo de cantidad puede parecer que trae en el uso de unidades bajo otro disfraz. ¿El enfoque alternativo de un cálculo de cantidad sugerida por Lodge, realmente utiliza una noción de cantidad que es independiente de las unidades después de todo? La respuesta es sí, porque la necesidad de referirse a las unidades particulares utilizadas se evita con un paso adicional importante: el requisito que relaciona las unidades y las cantidades es un requisito colocado en todo el sistema de unidades empleadas en una ciencia, en lugar de en cada unidad separadamente. Este requisito es que el sistema de unidades sea coherente.

Un sistema de unidades es coherente si las relaciones entre las unidades utilizadas para las cantidades son las mismas que la relación entre las cantidades en las ecuaciones fundamentales de la ciencia. En este punto de vista, por supuesto, las ecuaciones fundamentales se consideran ecuaciones cuantitativas. Usando el ejemplo de velocidad de nuevo, la ecuación fundamental que relaciona la velocidad, la longitud y el tiempo es que la velocidad es proporcional a la longitud e inversamente proporcional al tiempo, con una constante de proporcionalidad de unidad. El requisito de que el sistema de unidades utilizado sea coherente, exige que la relación entre la unidad utilizada para la velocidad, la unidad utilizada para la longitud y la unidad utilizada para el tiempo sea la misma que la relación en la ecuación fundamental, es decir, la ecuación cuantitativa V = l/ t. Como señaló Lodge, la constante de proporcionalidad de 1 es una elección que hemos tomado al seleccionar nuestro sistema de unidades para que sea coherente con las leyes fundamentales de la física. La ecuación numérica derivada de la ecuación de cantidad V a l/t tendrá entonces la misma para m que la ecuación de cantidad.

Por lo tanto, si se sabe que el sistema de unidades es coherente, se deduce que la ecuación numérica tiene la misma forma que la relación fundamental. Por lo tanto, la forma de la ecuación numérica puede conocerse independientemente del uso de unidades y expresiones numéricas para expresar las cantidades y luego derivar la ecuación numérica de la ecuación de cantidad siempre y cuando el requisito de que el sistema de unidades sea coherente se cumple. Lodge señaló que hay un elemento de convencionalidad en nuestra elección de unidades de longitud: "Si a, b son dos longitudes, el producto ab siempre se utiliza para representar [el área de] un rectángulo cuyos lados son a, b respectivamente; aunque podríamos haber acordado usarlo como una representación de un paralelogramo con los lados a, b que contiene un ángulo de (digamos) 60 [grados]" [Lodge 1888, p. 282]. Las operaciones aritméticas no descartan esta posibilidad. Sin embargo, el requisito de coherencia de un sistema de unidades determina algunas de esas opciones.

El paso elegante, en términos de requisitos colocados en un sistema de unidades, en lugar de en términos de requisitos colocados en las unidades elegidas para cada tipo de cantidad individualmente, resulta ser crucial para resolver una de las disputas filosóficas más desconcertantes: cómo entender el papel de las cantidades, unidades y leyes al convertir de un sistema de unidades a otro utilizado en la electrodinámica. En la mecánica clásica, las conversiones de un sistema de unidades a otro eran comparativamente directas y las preguntas que surgieron sobre los tipos de cantidades o la forma de ecuaciones fundamentales implicadas se resolvieron fácilmente mediante una aclaración adicional. Esto no era tan electrodinámico. La resolución de los problemas en electrodinámica se discute a continuación. La resolución de las cuestiones allí contribuye a nuestra comprensión de los aspectos convencionales (es decir, los aspectos que son una cuestión de elección) de los sistemas de unidades y cantidades físicas en otras ciencias. Veremos que el requisito de que un sistema de unidades sea coherente, resulta ser mucho más central para entender la relación entre cantidades, dimensiones y unidades de lo que uno podría haber sospechado.

2.2.- Cantidades físicas

Ha habido varias opiniones filosóficas sobre la relación lógica entre cantidades, unidades y sistemas de medición. Nuestro interés aquí es la prioridad lógica de las cantidades físicas con respecto a las unidades y medios de medición, no el orden histórico del desarrollo de los conceptos. Aunque hay cierto desacuerdo entre los filósofos de la ciencia en cuanto a lo que los símbolos en una ecuación científica representan [Palacios 1964, p.v i], la mayoría consideraría al menos las ecuaciones científicas como cantidades relacionadas sólo en la medida en que son al menos mensurable en principio. Entonces surge la pregunta de ¿cuál es lógicamente anterior: escalas, unidades de medida o las cantidades medidas? Si se considera que las cantidades físicas son lógicamente anteriores, surge la cuestión de qué sentido tiene hablar de las cantidades existentes independientemente de los medios para medirlas. ¿Cómo puede una cantidad como seis pies de altura ser lógicamente antes de un sistema de medición y especificación de una unidad? Por otro lado, si las cantidades físicas no son lógicamente anteriores a las unidades y las escalas de medición, uno podría preguntarse qué base podría haber para afirmar que una cantidad es algo más que el resultado de un proceso de medición.

Una visión influyente sobre la relación de las cantidades físicas y las unidades que es familiar para los filósofos de la ciencia, es la opinión de Brian Ellis en su primer trabajo sobre el tema de las cantidades en Conceptos Básicos de Medición. Su opinión es que "la existencia de una cantidad implica y está conlleva, un activo de relaciones de orden lineal" [Ellis, 1966, p. 32]. (Ellis distingue los criterios para la existencia de una cantidad de los criterios de identidad de las cantidades: es el pedido, y no las relaciones de pedido, los que proporcionan los criterios de identidad de las cantidades [Ellis, 1966, p. 32].) Al igual que el punto de vista de Percy Bridgman en su Análisis Dimensional [Bridgman, 1963], Ellis piensa que la magnitud relativa es invariable (siempre y cuando la misma dimensión esté asociada con las cantidades cuyas magnitudes se están comparando) [Ellis, 1966, p. 141]. Sin embargo, a diferencia de Bridgman, Ellis no toma este punto como el punto de partida de una teoría de las dimensiones. Más bien, utiliza invariancia de magnitud relativa de cantidades físicas similares como criterio para similitud de escalas, y luego define dimensiones como clases de escalas similares [Ellis, 1966, p. 140]. Entonces, Ellis dice, "[podemos decir que dos escalas X y X pertenecen a la misma dimensión si y sólo si la relación de dos mediciones en X es la misma que las relaciones de las mismas medidas en X."

En cuanto a la lógica de las cantidades y dimensiones físicas, muchos filósofos, entre ellos Ellis, se preocupan por distinguir su punto de vista de lo que Ellis denomina una visión "realista ingenua". Ellis describe la visión realista ingenua que la mayoría de los filósofos quieren rechazar como la opinión de que cantidades como amarillo o de seis pies de altura son propiedades de objetos, y que tales cantidades existen antes de especificar un medio de medición. El problema con una visión realista tan ingenua es evidente, como se mencionó anteriormente: ¿cómo podrían existir cantidades como estas antes de especificar un medio de medición o definir unidades para medirla? Como han señalado numerosos filósofos que escriben sobre el análisis dimensional, el análisis dimensional tiene lugar sólo en el contexto del uso de ecuaciones científicas, muchas de las cuales pueden expresarse de tal manera que tengan para cualquier conjunto coherente de unidades (un concepto definido a continuación). El interés de Ellis era identificar los elementos de convencionalidad en los medios de medición y unidades de medida. Más tarde criticó su propia propuesta presentada en Conceptos Básicos de Medición, sobre la cual todas las propiedades cuantitativas se sobreponen en las relaciones cuantitativas, concluyendo en 1992 que ese relato, aunque funciona para ubicaciones espaciotemporales, "no servirá" para propiedades como la carga, que llegó a pensar que era, a diferencia de la longitud, una propiedad intrínseca [Ellis, 1992, p. 177]. Una encuesta histórica de obras filosóficas sobre el tema está fuera del alcance de este artículo compilado. Algunos de los estudios críticos conocidos son: [Ehrenfest-Afanassjewa, 1916; Campbell, 1920; Bridgman, 1931; Langhaar, 1951; Duncan, 1953; Sedov, 1959; Birkhoff, 1960; Palacios, 1964; Pankhurst, 1964; Krantz et al., 1971; Becker, 1976].

2.3.- Sistemas de unidades

En este artículo, olvidamos la discusión adicional de las preguntas filosóficas sobre las cantidades de ciencia física discutidas en la sección anterior. Ahora consideramos la situación a la que se enfrenta hoy alguien haciendo un uso práctico de la teoría de sistemas físicamente similares. Gran parte del trabajo que se necesita considerar para identificar las cantidades de ciencia física, incluyendo no sólo el trabajo empírico involucrado en la formulación de las ecuaciones de la ciencia física, sino el trabajo analítico en la interpretación de las constantes en esas ecuaciones, determinar qué ecuaciones deben considerarse leyes o principios fundamentales y qué relaciones y ecuaciones deben considerarse definiciones, se hace antes de la especificación de un sistema particular de unidades coherentes. Por lo tanto, si uno ya está comprometido con el uso de un determinado sistema coherente de unidades, algunas cosas ya no estarán en cuestión: las decisiones y convenciones que afectan al número de cantidades requeridas en la ciencia física y cuáles serán consideradas cantidades básicas ya no están en entredicho, siempre que el sistema de unidades se considere satisfactorio. Utilizaremos aquí el sistema SI casi universalmente aceptado (Le Système International d'Unités), no como autoridad en estas cuestiones fundamentales, sino para ilustrar los tipos de cuestiones fundamentales que pueden surgir en el desarrollo de un sistema de unidades.

Cuando surgen nuevos desarrollos científicos que sugieran que podrían ser necesario añadir cantidades adicionales —como sucedió con el desarrollo del electromagnetismo a finales del siglo XIX—, estas decisiones deben ser reevaluadas y el sistema puede necesitar ser modificado o revisado. Una vez, el sistema CGS proporcionó un conjunto coherente de unidades para la mecánica newtoniana, pero no estaba claro qué decir en ese momento acerca de un conjunto coherente de unidades para el electromagnetismo. Había un sistema CGS para la mecánica newtoniana, un sistema CGS-M de unidades para magnetismo, y un sistema CGS-E de unidades para fenómenos eléctricos. Giorgi mostró en 1901 (Ver [Taylor y Thompson, 2008, p. 16].) por Giorgi que el sistema CGS podía ser modificado de maneras alternativas para proporcionar un conjunto coherente de unidades para las cantidades en las ecuaciones que describen los fenómenos electromagnéticos, de modo que se tenía que tomar una decisión. La decisión tomada por los comités que rigen el sistema SI fue incluir una unidad base para la cantidad física de corriente eléctrica; el sistema SI ahora proporciona un conjunto coherente de unidades con respecto a las ecuaciones de Maxwell, así como para las de Newton. Cuando se utiliza para el electromagnetismo, el sistema SI (que sigue a Giorgi) y los sistemas CGS más antiguos son realmente sistemas diferentes de unidades; para los fenómenos electromagnéticos, a diferencia para mecánica, el cambio de uno de estos sistemas a otro implica más que un simple cambio de unidades, ya que habrá algunas ecuaciones cuya forma difiere, dependiendo del sistema que uno esté utilizando. (La interdependencia de ecuaciones de electromagnetismo y sistemas de unidades no es trivial. Para un libro entero dedicado al tema véase [Cohen, 2001]. Para un tratamiento más filosófico e integral, véase el conjunto de cuatro documentos de Cornelius et al., sobre el tema [Cornelius et al., 1964;

1965a; 1965b; 1965c].) Por lo tanto, algunas de las unidades para los sistemas CGS más antiguos se conocen como unidades no SI [Taylor y Thompson, 2008, p. 37]. (Para otros puntos que deben tenerse en cuenta sobre el rango de aplicabilidad del sistema SI: El Sistema SI actual se desarrolló utilizando ecuaciones que no reflejan los efectos relativistas; esto se discute en [Taylor y Thompson, 2008, pág. 13]. Un ámbito en el que las revisiones o las embajadas al Sistema SI podrían producirse en el futuro es en la elaboración de unidades para cantidades que midan los efectos biológicos; las dificultades que habría que abordar se examinan en [Taylor y Thompson, 2008, pág. 14]. Actualmente se reconocen estas unidades, pero como unidades no SI.)

Los cálculos necesarios para cambiar de unidades CGS a las unidades Giorgi/SI fueron bastante complicados. Los intentos de explicar el origen de las complicaciones dieron lugar a desacuerdos profundamente asentados sobre la naturaleza de las cantidades, dimensiones y unidades. En 1964, Cornelius resumió los desacuerdos y presentó una resolución que se basó en gran medida en el papel de la coherencia de (un sistema de) unidades: "Considerando que las ecuaciones utilizadas en la electricidad son ecuaciones cuantitativas ha planteado una larga disputa. No se llegó a ningún acuerdo sobre la cuestión de si las diferencias entre los diferentes sistemas se deben a una diferencia en las unidades o en cantidades. . . . La diferencia real radica en un cambio en la forma de las ecuaciones y, por lo tanto, en un cambio en la coherencia de las unidades" [Cornelius et al., 1964, p. 1446]. También proporciona una explicación de la relación entre cantidad y dimensión: la dimensión no caracteriza una cantidad porque la dimensión no es totalmente independiente de la elección del sistema de unidades. Sin embargo, las cantidades como la carga, la longitud y la corriente son independientes de la especificación de un sistema de unidades. Cuando un cambio en el sistema de unidades implica un cambio en la forma de las ecuaciones de cantidad con respecto a las cuales ese sistema de unidades es coherente, la dimensión de la cantidad puede cambiar. Dicho de otro modo: La dimensión de una cantidad es relativa a un sistema de unidades en la medida en que un sistema de unidades implica seleccionar las ecuaciones de cantidad que relacionan las cantidades básicas de una ciencia. El punto es general para todas las ciencias.

Esta resolución de los desacuerdos en el electromagnetismo se basa en un punto importante hecho por Lodge al proponer un cálculo de cantidad: Los significados de los productos y cocientes en un cálculo de cantidad no tienen significados inequívocos. Se pueden tomar diferentes decisiones, incluso para dos sistemas coherentes diferentes. (Como se explicó anteriormente, esto se debe a que la coherencia se debe a una ecuación de cantidad determinada; se podrían tomar varias decisiones sobre la interpretación del producto ab de dos longitudes a y b.) Según su explicación, la diferencia entre Giorgi y varios sistemas de unidades CGS es realmente una cuestión de elegir un significado diferente para la relación de corriente a longitud. No se trata de un cambio en [el significado de una] cantidad [Cornelius et al., 1964; 1965a; 1965b; 1965c].

Tomar cantidades físicas para ser lógicamente antes de las unidades como se describió anteriormente permite a Ellis señalar que nada excluye la posibilidad de que una cantidad física determinada pueda ser medible por dos escalas diferentes, para las opciones entre dos conjuntos de escalas similares asociado con la cantidad física podría estar entre los artículos que deben liquidarse por convención, si uno de los principios de organización de un sistema de unidades es que cada cantidad debe tener una sola dimensión asociada a ella. Por lo tanto, aunque Ellis dice que la misma cantidad física podría asociarse con más de una dimensión (ya que, para él, una dimensión es una clase de escalas similares) y el Sistema SI adopta el enfoque de que cada cantidad tiene sólo una dimensión asociada a ella, estas vistas están abordando cuestiones ligeramente diferentes. La afirmación de que "cada una de las siete cantidades de base utilizadas en el sistema SI, se refiere a la no salvación de su dimensión anexa"[Taylor y Thompson, 2008,p. 11] se hace sobre un sistema coherente de unidades que contienen algunos aspectos convencionales, mientras que la declaración de Ellis es una sobre la posibilidad lógica de la existencia de una cantidad física para la cual es posible construir dos escalas de medición diferentes que cumplen sus criterios para una escala de medición. (En la sección sobre "Análisis dimensional y leyes numéricas" en el estudio ahora clásico Fundamentos de Medición [Krantz et al., 1971, p. 454], se afirma al principio que todas las medidas físicas que se están discutiendo serán tratadas como si fueran escalas de relación.)

El enfoque adoptado por el sistema SI es que son lógicamente anteriores a las unidades y los sistemas de medición tipos de cantidades físicas, como la cantidad o la longitud (en lugar de cantidades o propiedades como veinte topos o seis pies de altura). Las cantidades físicas que el sistema se compromete a proporcionar un medio para describir son las que están relacionadas por las ecuaciones y relaciones que constituyen la ciencia empírica, tales como masas, volúmenes, densidades, cantidad de sustancia, tiempos, distancias, velocidades, y otras. El sistema SI se desarrolla en el contexto de ecuaciones científicas aceptadas y, como se explica a continuación, es un sistema coherente de unidades. Como se señaló en [Krantz, 1971, p. 464], es cierto que "son de tal forma que no es necesario especificar las unidades en términos de las cuales se informan las diversas cantidades físicas, siempre que sea usada un sistema fijo de unidades coherentes.

Para explicar lo que se quiere decir aquí al decir que los tipos de cantidades utilizadas en la ciencia física son lógicamente anteriores a las unidades utilizadas en la ciencia física, comenzamos de nuevo con la geometría y luego consideramos las generalizaciones a las ciencias físicas. Podemos dar sentido a tales afirmaciones como la afirmación de que un cuadrado tiene lados de igual longitud o que la relación de la circunferencia de un círculo a su diámetro es siempre la misma, sin especificar un sistema de unidades, o hacer cualquier mención de una unidad en absoluto. Por lo tanto, se puede decir que la noción de longitud es lógicamente anterior a la de las unidades de longitud.

A continuación, consideramos si también podemos hablar de relaciones entre cantidades físicas sin especificar unidades o un medio de medición. Aquí también se trata de lo empírico, como se explicó anteriormente: las cantidades físicas son aquellas que tienen un lugar en un sistema de cantidades utilizadas en las ecuaciones de una ciencia física establecida. Las relaciones entre los sistemas de cantidades utilizadas en la ciencia física son proporcionadas por las ecuaciones fundamentales y las leyes de esa ciencia física. Dadas las relaciones y ecuaciones de la ciencia empírica, utilizadas para identificar y definir las relaciones entre estas cantidades, podemos dar sentido a las afirmaciones de que dos cantidades con las que asociamos la misma dimensión (dos longitudes, dos masas, dos intervalos de tiempo (locales), dos densidades) son iguales. En algunos casos puede resultar que determinar la veracidad o falsedad de tal reclamación requiere una investigación adicional, lo que puede implicar el uso de sistemas y unidades de medición. Sin embargo, esto no entra en conflicto con las opiniones en las que las dimensiones (tipos de cantidades) implicadas pueden considerarse lógicamente anteriores a la especificación de un sistema determinado de unidades. En el enfoque de que son las relaciones y ecuaciones de la ciencia las que determinan qué tipos de cantidades hay, los tipos de cantidades pueden considerarse independientes de la especificación de un sistema de unidades. Por lo tanto, tal realismo no es el realismo ingenuo que Ellis deseaba evitar; se refiere a los tipos de cantidades que son postuladas por las ecuaciones y principios actuales de la ciencia, basados en el papel que desempeñan en una ciencia asentada, que cumple con los estándares de la práctica científica actual. Está fuera del alcance de este artículo tratar preguntas sobre los detalles de estas normas; lo que es importante para nuestro tema aquí es que tales normas implican controles y equilibrios de varios tipos, por lo que se descarta la invención caprichosa de cantidades.

2.4.- Dimensiones y sistemas coherentes de unidades

En el desarrollo de un sistema de unidades, la ventaja de adoptar un enfoque en el que las cantidades físicas y las dimensiones asociadas a ellas se consideran lógicamente antes de las unidades, es que permite que cada unidad esté relacionada con las demás. Las unidades se pueden elegir de tal manera que estén relacionadas entre sí por las mismas ecuaciones y relaciones que los tipos de cantidades. Por lo tanto, es posible definir y elegir utilizar lo que se conoce como un conjunto coherente de unidades. Como se explica en la sección 2.1, la coherencia de un conjunto de unidades es relativa a un conjunto de ecuaciones cuantitativas de una ciencia que se considera tan básica, que se consideran leyes fundamentales de esa ciencia. Cuando un sistema de unidades es coherente con un conjunto de ecuaciones, las ecuaciones entre los valores numéricos de las cantidades tienen la misma forma que las ecuaciones entre las propias cantidades. (La descripción oficial del Sistema SI señala explícitamente que es una consecuencia del uso de un sistema coherente de unidades que "las ecuaciones entre los valores numéricos de las cantidades toman exactamente la misma forma que las ecuaciones entre las propias cantidades." [Taylor y Thompson, 2008, pág. 12].) Esta es una ventaja crucialmente importante; el objetivo de un conjunto coherente de unidades motivaron las opciones sobre cómo manejar las cantidades tal como se añadieron en el sistema actual de SI, y el hecho de que otros sistemas alternativos de unidades competidoras no fueran coherentes contaban en contra de elegirlas.

En el sistema SI, las cantidades básicas o fundamentales se denominan "cantidades base". Las cantidades base del sistema SI son longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa. Todas las demás cantidades se consideran cantidades derivadas. Es una consecuencia de la coherencia de un sistema de unidades que cada cantidad derivada puede ser escrita en términos de estas cantidades base (ya que estas relaciones son las dadas por las ecuaciones de la física). Cada una de las cantidades base tiene una dimensión asociada y la dimensión de cada cantidad derivada se puede escribir en términos de las dimensiones de las cantidades base. Por lo tanto, existe una forma canónica en la que expresar la dimensión de cualquier cantidad física derivada Q. Para ilustrar, para el Sistema SI, esto se indica:

$$\dim Q = \mathsf{L}^a \mathsf{M}^b \mathsf{T}^c \mathsf{I}^d \theta^e \mathsf{N}^f \mathsf{J}^g$$

Donde L es el símbolo para la dimensión de la longitud de la cantidad base, M es el símbolo para la dimensión cantidad base de la masa , T es el símbolo para la dimensión de la cantidad base de tiempo, I es el símbolo para la dimensión cantidad base de la corriente eléctrica, θ es el símbolo para la dimensión cantidad base de la temperatura, N es el símbolo para la dimensión de la cantidad base de sustancia y J es el símbolo para la dimensión de la cantidad base de intensidad luminosa [Taylor y Thompson, 2008,p. 11]. Los superíndices a, b, c, d, e, f y g denotan exponentes dimensionales. (La expresión anterior indica la dimensión por las letras mayúsculas mostradas en lugar de por el uso de corchetes.) Para poner el punto en términos generales: para cualquier sistema coherente de unidades, existe una forma canónica en la que o expresar la dimensión de cualquier cantidad física derivada Q, es decir, utilizando nuestra notación en la que los corchetes indican la dimensión de la cantidad:

$$\dim Q = [Q_1]^m [Q_2]^n [Q_3]^o [Q_4]^p [Q_5]^r [Q_6]^s [Q_7]^t$$

Donde Q_1,...,Q_7 son los símbolos para la dimensión de las cantidades base, sean cuales sean, y [Q_1],...,[Q_7] son símbolos para las dimensiones de las cantidades base. Los superíndices m, n, o, p, r, s y t, denotan exponentes dimensionales.

El énfasis en la discusión anterior en los símbolos utilizados para representar dimensiones es intencional; las pruebas derivadas de las consecuencias de los principios del análisis dimensional se basan casi en su totalidad en hechos sobre la representación simbólica de las dimensiones y su manipulación. Las dimensiones se pueden manipular de acuerdo con las reglas de la manipulación algebraica, aunque las ecuaciones dimensionales son de un tipo diferente de las ecuaciones de la ciencia física de las que se obtuvieron. La discusión anterior tiene por objeto proporcionar una apreciación de lo que se construye en la representación simbólica de la dimensión: refleja algunos aspectos estructurales del contenido empírico de la física en su conjunto, (Por "aspectos estructurales del contenido empírico de física en su conjunto", me refiero a las relaciones entre las cantidades derivadas y fundamentales implícitas en cualquier ecuación científica que se utilice en el desarrollo de un sistema de unidades.) algunas reglas simples de álgebra y aritmética estándar, y convenciones de varios tipos. También nos ayuda a ver dónde están involucradas algunas de las convenciones del sistema SI y, en algunos casos, si son arbitrarias o no. Por ejemplo, la elección de qué cantidades se toman como cantidades base es arbitraria en la medida en que hay otros conjuntos de cantidades que podrían servir como el conjunto de cantidades base. Sin embargo, una vez que se eligen las cantidades base, la forma en que las unidades base están relacionadas entre sí no es arbitraria, ya que las relaciones entre ellas están determinadas por las ecuaciones de la ciencia física.

Uno de los principios utilizados para el Sistema SI es que la dimensión de cada cantidad, ya sea base o derivada, es única; es decir, sólo hay una dimensión de tal forma canónica asociada a cada cantidad Q. Dado que el número de cantidades derivadas es ilimitado, y el número de dimensiones de la forma canónica es ilimitado, se puede preguntar si hay una cantidad única asociada con cada dimensión de la forma canónica. La respuesta es que no más de una cantidad puede tener una dimensión determinada asociada a ella, del mismo modo que más de una cantidad puede tener las mismas unidades (la capacidad de calor y la entropía se consideran cantidades físicamente distintas, aunque ambas se miden en joule/Kelvin; la corriente eléctrica y la fuerza magneto motriz se miden en amperios [Taylor y Thompson, 2008, p. 26]).

Por lo tanto, no se puede deducir de una dimensión, la cantidad con la que está asociada esa dimensión, ya que la cantidad no se determina de forma única. Sin embargo, se pueden hacer algunas inferencias a partir de la dimensión: si se utiliza un sistema coherente de unidades, se puede al menos inferir qué unidades tiene una cantidad de las dimensiones de esa cantidad. Si la dimensión se escribe en forma canónica, la sustitución de la dimensión por las unidades utilizadas para medir la cantidad base con la que está asociada esa dimensión proporcionará las unidades para esa cantidad. Esto no es sorprendente, ya que se desprende del hecho de que cada cantidad base tiene una dimensión única y una unidad única asociada a ella, y que cada cantidad derivada tiene una forma canónica única expresada en términos de las cantidades base, que cada cantidad tendrá asociado con él un conjunto único de unidades expresadas en términos de las siete unidades base.

3.- CANTIDADES SIN DIMENSIONES

Para algunas cantidades Q, todos los exponentes dimensionales en la expresión dimQ $= [Q_1]^m[Q_2]^n[Q_3]^o[Q_4]^p[Q_5]^r[Q_6]^s[Q_7]^t$ serán iguales a cero. A continuación, dimQ = 1, y se dice que Q no tiene dimensiones o es de la dimensión uno. La unidad asociada a ella puede considerarse una unidad derivada; se dice que esa cantidad sin dimensiones tiene una unidad derivada coherente de una. Cualquier relación de dos cantidades de la misma dimensión no tendrá dimensiones y tendrá la dimensión uno. Por lo tanto, el número Mach y el índice de refracción no tienen dimensiones. La cota de un ángulo plano, para el que se utiliza el radián de la unidad, también es sin dimensiones.

El Sistema SI también asigna la dimensión de uno a "contando cantidades", como se indica a continuación:

> También hay algunas cantidades que no se pueden describir en términos de las siete cantidades base del SI en absoluto, pero tienen la naturaleza de un recuento. Ejemplos son el número de moléculas, la degeneración en la mecánica cuántica (el número de estados independientes de la misma energía) y la función de partición en la termodinámica estadística (el número de estados térmicamente accesibles). Estas cantidades de recuento también se consideran generalmente cantidades sin dimensión, o cantidades de dimensión uno, con la unidad uno, 1. [Taylor y Thompson, 2008, pág. 12].

El hecho de que tanto el recuento de cantidades (que toman valores integrales) como los parámetros sin dimensiones utilizados para establecer la similitud física (que toman valores de números reales) sean de dimensión uno no es paradójico. Porque, en general, si bien es cierto que sólo hay una dimensión canónica por cantidad, también es cierto que, dada una determinada dimensión, puede haber más de una cantidad que tenga asociada la dimensión dada.

Como se menciona en la sección 1.2 anterior, la similitud de los sistemas físicos se establece mostrando que los parámetros sin dimensiones que caracterizan el comportamiento de interés del sistema tienen el mismo valor. Los significados físicos de diferentes parámetros sin dimensiones son, por supuesto, muy diferentes, por lo que, si se requiere más de un parámetro sin dimensiones para caracterizar el comportamiento del sistema, esto equivale a decir que los sistemas deben ser similares en ambos sentidos con el fin de ser similar con respecto al comportamiento de interés. El caso más simple es el caso en el que el comportamiento de interés se caracterizó por un único parámetro sin dimensiones. Algunos ejemplos de esto son que el comportamiento con respecto a la existencia de ondas de choque se caracteriza por el número Mach, y el comportamiento con respecto al flujo turbulento se caracteriza por el número Reynolds. Muchos parámetros sin dimensiones estaban en uso antes de que se desarrollara la base formal para el método de similitud física. A menudo se concibieron como relaciones de dos cosas similares, como dos velocidades (número Mach), dos longitudes (relación de esbeltez) o dos fuerzas (número de Froude, que se puede concebir como la relación de las fuerzas de inercia l con las fuerzas gravitacionales). Muchas de las proporciones sin dimensiones en uso se pueden concebir como la proporción de dos cosas similares mediante la reorganización de las cantidades que aparecen en ellas (incluso si no parecen serlo al principio, y aunque se requiere alguna manipulación algebraica para reagruparlas en expresiones que revelan dos cantidades similares que son físicamente significativas).

4.- PARÁMETROS SIN DIMENSIONES Y SISTEMAS FÍSICOS

4.1.- Ecuaciones dimensionales y homogeneidad dimensional

Dada una ecuación que relaciona cantidades físicas, se puede escribir una ecuación dimensional correspondiente a ella. Esto se hace reemplazando el símbolo de la cantidad física por el símbolo de la dimensión asociada a él; la notación estándar utilizada aquí es poner corchetes alrededor del símbolo para una cantidad. Si la relación entre la cantidad y las cantidades base del sistema se conoce para cada una de las cantidades físicas que ocurren en la ecuación, entonces tenemos una ecuación dimensional escrita únicamente en términos de las dimensiones asociadas con las básicas o cantidades fundamentales. Por lo tanto, para una ecuación que expresa el hecho de que un tiempo transcurrido es igual a la suma de dos distancias diferentes divididas por las dos velocidades diferentes alcanzadas en el recorrido de las mismas que está escrita:

$$(D_1/v_1) + (D_2/v_2) = t_T \qquad \text{(i)}$$

(Donde D_1 y D_2 se encuentran para distancias designadas, v_1 y v_2 son para las velocidades designadas, y t_T representa el tiempo necesario para atravesar D_1 y D_2). La ecuación dimensional correspondiente a ella, utilizando corchetes para indicar la dimensión de la cantidad encerrada en el corchete, no se ve tan diferente a primera vista:

$$[D_1/v_1] + [D_2/v_2] = [t_T] \qquad \text{(ii)}$$

Que, cuando se expresa en términos de las dimensiones de las cantidades básicas del sistema, se convierte en:

$$[L][L]^{-1}[T] + [L][L]^{-1}[T] = [T] \qquad \text{(iii)}$$

Sin embargo, las ecuaciones dimensionales (ii) y (iii) no son el mismo tipo de ecuación que la ecuación (i) en la medida en que relacionan dimensiones. Aquí L designa la cantidad de longitud y T designa cantidad de tiempo. No se hace distinción entre las dos longitudes diferentes atravesadas o las dos velocidades diferentes alcanzadas; lo que se está relacionando son las dimensiones asociadas con cada cantidad. Dado que la longitud y el tiempo se toman para estar entre las cantidades básicas en un sistema, podemos expresar la ecuación dimensional en las dimensiones básicas [L] y [T], como hemos hecho en (iii) arriba. La afirmación de que la ecuación es dimensionalmente homogénea se refleja en un hecho sintáctico: los exponentes de las dimensiones [L] y [T] son los mismos para los términos en cada lado de la ecuación. El punto es general: si se indica una ecuación dimensional en términos de un conjunto de dimensiones de las cantidades base, el criterio de homogeneidad dimensional es que los exponentes de las dimensiones para cada cantidad básica en una ecuación dimensional deben ser los mismos en ambos lados de la ecuación.

4.2.- Homogeneidad dimensional, parámetros sin dimensiones e inferencia basada en similitudes

Gran parte de la importación práctica del análisis dimensional surge del principio lógico poderoso y simple (o, tal vez, gramatical) con respecto al requisito de homogeneidad dimensional, que se aplica a las ecuaciones dimensionales. El principio se conoce como el principio de homogeneidad dimensional. Por lo tanto, incluso si no se conoce la solución a la ecuación física asociada, el principio se puede emplear para obtener información aplicándola a las ecuaciones dimensionales. Lo que es algo sorprendente, muy sorprendente, y especialmente significativo sobre el principio de homogeneidad dimensional en cuanto a nuestra investigación sobre el uso de la similitud, es que el principio de homogeneidad dimensional puede producir resultados significativos y útiles incluso en ausencia de una ecuación que describa el comportamiento de interés. En su lugar, podemos aplicar el principio de una manera que haga uso de las dimensiones de las cantidades que deben ocurrir en tal ecuación, aunque la ecuación en sí sigue siendo desconocida. Por lo tanto, el principio de homogeneidad dimensional es un método distinto del método de transformación de ecuaciones en forma sin dimensiones.

El principio de homogeneidad dimensional aplicado de esta manera proporciona resultados útiles y significativos al proporcionar criterios de similitud a partir del conocimiento de qué cantidades físicas son relevantes para los sistemas y el fenómeno de interés. Estos criterios de similitud se pueden utilizar para obtener información sobre un sistema basado en el conocimiento de otro que es similar a él. El hecho de que una cantidad tan significativa de información se pueda obtener de una lista de las cantidades de las que depende un fenómeno, a menudo se ha encontrado algo misterioso. Por supuesto, hay una gran cantidad de información de fondo que se está aprovechando implícitamente en el uso del principio de esta manera: si estamos utilizando un sistema coherente de unidades, el hecho de que las dimensiones en sí están relacionadas por las ecuaciones fundamentales de un físico, la ciencia está implícitamente involucrada, de modo que la información extraída al elaborar los criterios de similitud ciertamente implica algunas ecuaciones científicas (por ejemplo, leyes y principios fundamentales de la ciencia) implícitamente, incluso cuando una ecuación que describe el comportamiento o fenómeno de interés en un sistema físico en particular no está a la mano. El comportamiento de interés podría ser un fenómeno particular, como la transición al flujo turbulento o la generación de ondas de choque, o podría referirse a un aspecto del comportamiento del sistema, como una distribución de la temperatura, las rutas trazadas por un punto en particular o puntos en el sistema, un perfil de velocidad de flujo o la distribución de fuerzas y tensiones dentro del sistema.

Si todo lo que uno sabe es qué cantidades físicas son las que depende un determinado fenómeno, el principio de homogeneidad dimensional puede emplearse para identificar un conjunto de proporciones sin dimensiones de las que depende el fenómeno. El proceso analítico que conduce a la identificación de las cantidades físicas de las que depende el comportamiento de interés para el sistema cuando uno no tiene una ecuación de gobierno en la mano, no es enteramente una cuestión de lógica y matemáticas. Un paso inicial crucial es identificar el sistema físico cuyo comportamiento debe caracterizarse, y esto a menudo implica conocimientos prácticos y empíricos necesarios para hacer las idealizaciones y simplificaciones apropiadas del sistema real. Luego, identificar las cantidades físicas de las que depende el comportamiento de ese sistema podría implicar la invocación de principios científicos generales, como las leyes de conservación, para identificar las cantidades involucradas en los equilibrios de fuerza o equilibrios de flujo. Por ejemplo, uno podría utilizar el principio de la conservación de la masa y escribir balances de masa según el cual se identificaran todas las cantidades involucradas en un sistema en el que la masa cruza el límite del sistema, o se podría utilizar principios de equilibrio y dibujar un diagrama de cuerpo libre con el fin de ayudar a identificar las cantidades físicas implicadas en un sistema mecánico. El conjunto de relaciones sin dimensiones que caracterizan el comportamiento de interés de un determinado sistema físico (y, por lo tanto, caracterizar una clase de sistemas que serán físicamente similares con respecto al comportamiento o fenómeno de interés) no es único.

Podría parecer a primera vista, que tener un conjunto de proporciones sin dimensiones de las que depende el comportamiento de interés de un sistema determinado no proporcionaría mucha más información, o sería de mucho más uso, que simplemente tener una lista de las cantidades físicas sobre las que depende el comportamiento de interés para el cual ese sistema depende. La razón por la que es de hecho más útil hacerlo es que, a diferencia de la lista de cantidades físicas, el conjunto de relaciones sin dimensiones que caracteriza el comportamiento de interés para un sistema determinado proporciona condiciones de similitud: criterios de similitud de sistemas con respecto a un comportamiento de interés. El comportamiento de interés a menudo se indica por el contexto y no siempre se identificará explícitamente, pero es importante reconocer que, aunque lo que estamos hablando aquí está proporcionando condiciones formales de similitud, siempre es con respecto a la similitud, y por lo tanto, en relación con, algún comportamiento o fenómeno de interés. Si todas las relaciones sin dimensiones de un conjunto de este tipo tienen el mismo valor en un sistema en particular que en otro sistema en particular, esos dos sistemas son físicamente similares. El conjunto de relaciones sin dimensiones caracteriza un número no especificado de sistemas físicamente similares. Puede haber un número infinito de sistemas cuyo comportamiento se caracteriza por el mismo conjunto de relaciones sin dimensiones y en los que esas relaciones sin dimensiones pueden asumir los mismos valores que tienen en cuenta en el sistema dado. O, en el otro extremo, si las condiciones de similitud son muy restrictivas, puede haber muy pocos otros sistemas, posiblemente incluso ninguno, que sean físicamente similares a un sistema determinado.

La ventaja práctica de saber de qué proporciones (parámetros sin dimensiones) depende el fenómeno o comportamiento de interés, en lugar de simplemente saber de qué cantidades físicas se basa el fenómeno o el comportamiento depende, es que el conjunto de relaciones sin dimensiones que caracteriza el comportamiento de un determinado sistema también proporciona una manera de establecer que dos sistemas diferentes son físicamente similares y, por lo tanto, informa a un investigador de cómo construir un sistema que será similar al sistema dado, con respecto al comportamiento de Interés. Esto no es algo que se puede hacer directamente usando una lista de cantidades físicas sola. (El tema de los sistemas físicamente similares y la inferencia científica se discute más adelante en [Sterrett, 2002].) La situación aquí es igual que para la similitud geométrica: caracterizamos las formas geométricas por las proporciones (sin dimensiones) relevantes para caracterizarlas, y establecemos que dos figuras geométricas son similares (tienen la misma forma) mostrando que todos los coeficientes pertinentes son los mismos en una figura que en otra. Conocer las relaciones sin dimensiones relevantes para figuras geométricamente similares nos permite construir figuras geométricamente similares, una estrategia utilizada en geometría. Sin el conocimiento de que un cierto conjunto de relaciones caracteriza una determinada forma (no tiene por qué ser un conjunto único), no podríamos establecer que dos figuras geométricas sean físicamente similares; mientras que, con ese conocimiento, somos capaces de hacerlo.

Además, el conocimiento de que ciertas relaciones son iguales en las dos cifras similares o los dos sistemas similares permite al analista o experimentador inferir los valores de una determinada cantidad física si se conocen los valores de todas las demás cantidades físicas. Este paso es sencillo: los valores se pueden calcular utilizando el hecho de que las relaciones sin dimensiones son numéricamente iguales, mediante una simple manipulación algebraica. Si esta manipulación se lleva a cabo algebraicamente, las ecuaciones que relacionan el valor de una cantidad física determinada en una figura o sistema en términos de los valores de esa cantidad física en la segunda, a la que es similar. Estas relaciones se conocen a veces como leyes de modelado, y la relación entre las figuras geométricamente similares correspondientes o sistemas físicamente similares es lineal y se puede describir completamente en términos de un factor de escala. Un ejemplo común es la relación que expresa las velocidades que se producen en un sistema, en términos de las velocidades en otro; estos pares se denominaron velocidades correspondientes. A menudo se desea conocer el intervalo de tiempo en un sistema expresado como un múltiplo del intervalo de tiempo en el sistema que lo modela; generalmente el tiempo va más rápido en un modelo a pequeña escala que en el prototipo que se está modelando. Estas relaciones sólo se mantendrán en la medida en que se cumplan las condiciones de similitud, por supuesto.

5.- TEOREMA DE BUCKINGHAM

La capacidad de inferir correctamente los valores de las cantidades en un sistema físico del conocimiento de los valores de las cantidades en un sistema que es físicamente similar a él se basa en la capacidad de establecer correctamente que los dos sistemas son físicamente similares. A su vez, como hemos visto, la capacidad de establecer correctamente que dos sistemas son físicamente similares se basa en la capacidad de identificar un conjunto de parámetros sin dimensiones que caracteriza el comportamiento del sistema con respecto al comportamiento o fenómeno de interés. El conjunto de parámetros sin dimensiones no es único; cualquier conjunto de este tipo es suficiente para establecer la similitud. Ahora abordamos la cuestión de identificar estos conjuntos de parámetros sin dimensiones para un problema específico. Uno necesita no sólo encontrar un conjunto suficiente de parámetros sin dimensiones, sino también saber que se ha encontrado un conjunto tan suficiente.

Un punto significativo establecido en el documento de Buckingham es que tales conjuntos de parámetros sin dimensiones están determinados por el principio de homogeneidad dimensional, junto con una lista de todas y sólo las cantidades físicas que son relevantes para el comportamiento o fenómeno de interés. El documento de Buckingham también incluyó un resultado sobre el número mínimo de parámetros sin dimensiones que se requieren para caracterizar el comportamiento del sistema y, por lo tanto, el número mínimo de parámetros sin dimensiones que se requieren para establecer que dos sistemas son físicamente similares. Esto tiene una importancia práctica de gran valor, ya que permite minimizar el número de experimentos de laboratorio que deben realizarse en investigaciones con modelos experimentales, y el documento se cita a menudo para este resultado. El razonamiento en la prueba que dio de ese resultado ha sido criticado por falta de rigor matemático en algunos aspectos. Sin embargo, es bastante útil en el que ilustra cómo configurar ecuaciones dimensionales y las relaciones que los exponentes deben tener entre sí. A continuación, se aplica el principio de homogeneidad dimensional y la solución produce los parámetros sin dimensiones en el conjunto.

El análisis de Buckingham al establecer las condiciones para el teorema continúa considerando un sistema que está experimentando una transformación en lugar de considerar dos sistemas físicos distintos en los que los puntos de uno se asignan a los puntos del otro, razonando como sigue: "Que S sea un sistema físico, y que una relación subsista entre una serie de cantidades Q que pertenecen a S. Imaginemos que S se transformará en otro sistema S' para que S' corresponda a S en cuanto a las cantidades esenciales. No hay sentido de la transformación en el que podamos suponer que las cantidades dejan de ser dependientes unos sobre otros; por lo tanto, debemos suponer que alguna relación subsistirá entre las cantidades Q' en S' que corresponden a las cantidades Q en S.... Tenemos que preguntar qué tipo de transformación llevaría a [el resultado de que] dos sistemas sean similares en lo que respecta a una relación física determinada". [Buckingham, 1914, p. 353] Por lo tanto, esta concepción de similitud implica la preservación de lo que sea que se requiera para garantizar la similitud entre el sistema en cualquier momento del proceso y el sistema en cualquier otro punto del proceso (es decir, esto podría considerarse como la "forma" del sistema, que es lo que garantiza la similitud de los parámetros sin dimensiones que caracterizan el sistema a lo largo del proceso). Buckingham presentó la aplicación a modelos de escala experimental como un caso especial de un sistema sometido a una transformación de un tamaño a otro. Algunos tratamientos posteriores que proporcionan una prueba más matemática son: [Pankhurst, 1964; Langhaar, 1951; Duncan, 1953] y [Palacios, 1964]. Aquí ponemos una controversia secundaria sobre la prueba del propio teorema, ya que nos preocupa principalmente entender las premisas del teorema, la conclusión del teorema y el papel del principio de homogeneidad dimensional en él. Las premisas del teorema son las que siguen:

(a) Existe una relación dimensionalmente homogénea entre las n cantidades p_1, p_2, p_3,... p_n de lo cual depende un cierto fenómeno o comportamiento. Lo denotamos por la ecuación $f(p_1,p_2,p_3,...\ p_n) = 0$. Las cantidades p_1, p_2 , p_3,... p_n relacionado por esta ecuación incluyen todos los que depende el fenómeno, y el fenómeno depende de todas las cantidades de la lista.

(b) Aplicar el principio de homogeneidad dimensional a la ecuación dimensional asociada con $f(p_1,p_2,p_3,...\ p_n) = 0$ considerando k ecuaciones independientes que relacionan los exponentes en la ecuación dimensional. En general, habrá una ecuación independiente para cada una de las cantidades base k Q_1, Q_2, Q_3,..., Q_k, donde k es el número mínimo de cantidades base necesarias para expresar las n cantidades p_1, p_2, p_3,..., p_n en términos de cantidades base.

La conclusión del teorema es la siguiente: Es una consecuencia del principio de homogeneidad dimensional que la ecuación $f(p_1,p_2,p_3,...\ p_n) =0$ es reducible a una ecuación que relaciona (n-k) parámetros independientes sin dimensiones π_1, π_2, π_3,…………π_{n-k} ,donde cada parámetro adimensional está compuesto solo de los productos que son cantidades de base k. Es decir, $f(p_1,p_2,p_3,...,p_n) = 0$ es reducible a una ecuación de la forma $f(\pi_1, \pi_2, \pi_3,…………\pi_{n-k})$, es decir, una ecuación que relaciona los parámetros sin dimensiones (n-k). En general, el conjunto $(\pi_1, \pi_2, \pi_3,…………\pi_{n-k})$ no será único en general. Como se explica en la sección 4.2 anterior, la ventaja de saber que existe una ecuación que relaciona los valores πs sin dimensiones es que este conocimiento proporciona criterios de similitud para sistemas físicamente similares, incluso si no se conoce la ecuación que relaciona los πs. El conocimiento de tal conjunto de parámetros sin dimensiones es suficiente para que determinemos cómo construir un sistema físico de tal manera que sea físicamente similar (con respecto a un determinado comportamiento o fenómeno de interés) a otro sistema dado, si es posible hacer.

Buckingham ilustró el método de sistemas físicamente similares con un ejemplo concreto pero bastante involucrado: la similitud dinámica de una propela. Escribir una ecuación que describa el comportamiento dinámico de la propela es difícil, pero identificar las cantidades físicas de las que depende el comportamiento de la propela es menos. Identifica las siguientes siete cantidades físicas como aquellas de las que depende el comportamiento dinámico de la propela: fuerza, longitud característica y todas las relaciones de longitud necesarias para caracterizar la forma de la propela, revoluciones por unidad de tiempo, velocidad de avance, densidad y viscosidad del fluido en el que se sumerge la propela, y la aceleración gravitacional. Por lo tanto, hay una ecuación que relaciona las siete cantidades; lo que no se especifica. Sólo se requieren tres cantidades base (que, en el sistema SI, serían masa, longitud y tiempo) para expresar las cantidades de esta lista. Por lo tanto, el número mínimo de parámetros sin dimensiones necesarios para caracterizar el sistema es de 7 – 3 = 4. Aquí está uno de los conjuntos de parámetros sin dimensiones que deriva para este problema:

$$\left(\frac{\rho D^2 S^2}{F}, \frac{\rho D^i n^2}{F}, \frac{\mu^2}{F_\rho}, \frac{\rho D^3 g}{F}\right)$$

Donde ρ es densidad, D es el diámetro (elegido como la longitud característica), S es la velocidad de avance, F es la fuerza ejercida por la propela, n es el número de revoluciones por unidad de tiempo, μ es la viscosidad, y g es la aceleración gravitacional. Estos son los s en la ecuación mencionada anteriormente a los que se puede reducir la ecuación en términos de las variables f(ρ, D, S, F, η, μ, g): f(π_1, π_2, π_3,…………π_{n-k}), donde f es una función indeterminada.

6.- SIMILARIDAD "EN CIERTOS ASPECTOS", SIMILARIDAD COMPLETA Y SIMILARIDAD PARCIAL

Ahora consideramos más específicamente a qué se equivale la similitud. Para establecer que dos sistemas físicos, cada uno de los cuales se caracteriza por el mismo conjunto de cantidades sin dimensiones π_1, π_2, π_3,…………π_k) son físicamente similares, lo que tenemos que establecer es que el valor de π_1 en el sistema A es igual al valor de π_1 en el sistema B , y que el valor de π_2 en el sistema A es igual al valor de π_2 en el sistema B, y pronto para cada uno k de los parámetros sin dimensiones π_s. Eso es lo que se requiere para lograr la plena similitud física entre dos sistemas, con respecto a los fenómenos y el comportamiento de interés. Sin embargo, en la práctica, a menudo sólo se intenta la similitud parcial. Hay varias razones diferentes por las que sólo se puede intentar la similitud parcial.

A veces el requisito de similitud geométrica se viola deliberadamente en la construcción de un modelo. Hay casos en los que los beneficios de la similitud completa, es decir, de mantener las relaciones a distancia iguales entre dos sistemas, son compensados por algún otro beneficio. Los modelos distorsionados geométricamente (a veces denominados simplemente modelos distorsionados) se utilizan ampliamente en modelos costeros y fluviales. Para poder modelar grandes áreas con modelos de tamaño razonable pero que no tienen la tensión superficial del agua en el modelo juegan un papel exagerado en el modelo, las dimensiones verticales no se reducen tanto como las dimensiones horizontales. Entonces, habrá más de un factor de escala involucrado para la cantidad de longitud. Esto es poner las cosas de una manera un poco simplificada, ya que el razonamiento sobre los detalles del modelado puede estar bastante involucrado y emplear sofisticadas matemáticas y física [Hughes, 1993].

A veces se prefiere la similitud completa, pero no es posible lograrla. Hay muchos problemas de modelado para los cuales el único sistema posible que es físicamente similar al sistema dado es uno del mismo tamaño, por lo que, no importa cuáles sean los recursos a la mano, no es posible construir un modelo de escala de un tamaño distinto de uno de tamaño completo, y aun así alcanzar la similitud plena. Esto no es una cuestión de practicidad; a menudo es el caso de que incluso en principio es imposible satisfacer simultáneamente todos los requisitos especificados manteniendo el valor de todos los s de los que dependen los fenómenos de interés de la misma manera en el modelo que en el prototipo. Por lo tanto, la mayoría de los modelos, incluso geométricamente similares, se distorsionarán en el sentido técnico de que no todos los elementos sin dimensiones son los mismos en el modelo que en el prototipo [Hughes, 1993]. Sin embargo, el término modelo distorsionado se reserva generalmente para los modelos distorsionados geométricamente, y el hecho de que no se cumplan todos los criterios de similitud física se indica en cambio diciendo que sólo se ha logrado una similitud parcial entre el modelo y el Prototipo. Lo que a menudo se hace es construir un modelo que tenga como objetivo la similitud con respecto a uno o sólo algunos de los "s", y otro modelo que tenga como objetivo la similitud con respecto a otro de los parámetros . Así, la situación habitual es que uno tiene varios modelos a escala, ninguno de los cuales ha logrado una similitud física completa con el prototipo, pero cada uno de los cuales es parcialmente similar a él de una manera prescrita, y que se utiliza sólo para inferencias con respecto a la fenómenos o comportamiento asociado con los parámetros sin dimensiones que son los mismos entre el modelo y el prototipo.

Los puntos sobre la práctica del modelado a escala se mantienen para el uso de similitud física entre sistemas en general. Es decir, las declaraciones de similitud son por su propia naturaleza, similitud en relación con un cierto fenómeno o comportamiento del sistema. Incluso la similitud completa es sólo la similitud en relación con un cierto fenómeno o comportamiento del sistema. Sin embargo, existen métodos para establecer la similitud en relación con diferentes fenómenos y diferentes comportamientos del sistema, como hemos visto, podemos derivar los parámetros sin dimensiones (relaciones) que caracterizan un cierto fenómeno o comportamiento de un sistema del conocimiento sobre que no siempre implica que podamos describir el comportamiento del sistema en términos de una ecuación, mucho menos en términos de una para la que sabemos obtener soluciones. Así que la similitud es siempre la similitud relativa, al igual que en la mecánica, la velocidad es siempre la velocidad relativa. La similitud parcial es una noción diferente a la similitud relativa, pero también es una cuestión de similitud con respecto a un comportamiento de interés. Sin embargo, ninguno de estos puntos implica que no podamos decir en qué se trata la similitud, lejos de ella. Podemos decir claramente en qué se basa la similitud, incluso en los casos en que no es alcanzable, y podemos decir mucho sobre las consecuencias que podemos extraer de forma fiable utilizándola.

CAPITULO VIII

8.- TEORÍA DE LA MEDICIÓN E INGENIERÍA

Por Patrick Suppes

1 INTRODUCCION

Un análisis conceptual de la medición puede comenzar correctamente formulando los dos problemas fundamentales de cualquier procedimiento de medición. El primer problema es el de la representación, justificando la asignación de números a objetos o fenómenos. Lo que debemos mostrar es que la estructura de un conjunto de fenómenos bajo ciertas operaciones empíricas y relaciones, es la misma que la estructura de algún conjunto de números bajo las operaciones y relaciones aritméticas correspondientes. La solución del problema de representación para una teoría de la medición no pone completamente al blanco la estructura de la teoría, ya que a menudo hay una diferencia formal entre los tipos de asignación de números derivados de diferentes procedimientos de medición. Este es el segundo problema fundamental, determinar el tipo de escala de un procedimiento determinado. El tipo de escala se basa en la prueba de un teorema en varianza para la representación. Esta es otra forma de indicar el segundo problema fundamental. En esta introducción ampliamos este punto de vista general. A continuación, la sección 2 se centra en cuatro tipos de medidas que ejemplifican, en el simple entorno matemático de los modelos finitos con igual espacio, la naturaleza detallada de la representación y el teorema en varianza

En la sección 3 se considera con mayor detalle el importante caso de la medición extensiva, con especial atención a la aproximación cualitativa con medidas superiores e inferiores. La Sección 4 desarrolla una teoría cualitativa bastante general de la probabilidad de error. La sección 5 contiene breves observaciones sobre varios temas de interés general que no podrían tratarse en detalle.

1.1.- Representación numérica

Una representación de algo es una imagen, modelo o reproducción de esa cosa. Las referencias a las representaciones son familiares y frecuentes en el discurso ordinario. Algunas instancias típicas son las siguientes:

El sueño es una cierta imagen y representación de la muerte.

La Obra es una representación de un mundo que una vez conocí bien.

En algunos casos podemos pensar en una representación como una mejora de nuestra comprensión del objeto representado. Muchos de nosotros ciertamente entendemos las proporciones de un edificio, especialmente la disposición del interior, después de examinar sus dibujos arquitectónicos.

La teoría formal o matemática de la representación tiene como objetivo principal tal enriquecimiento del entendimiento, aunque hay otros objetivos de representación de casi la misma importancia, por ejemplo, el uso de representaciones numéricas de medición para hacer que los cálculos sean más eficientes. Antes de pasar al isomorfismo de modelos de una teoría como el enfoque formal general de la representación, es importante caracterizar dos modelos o estructuras de una teoría isomórfica. En términos generales, dos modelos de una teoría son isomórficos cuando exhiben la misma estructura desde el punto de vista de los conceptos básicos de la teoría. El punto de la definición formal de isomorfismo para una teoría particular es hacer precisa esta noción de la misma estructura. Sin embargo, hay que subrayar que la definición de isomorfismo de los modelos de una teoría no depende de la naturaleza detallada de la teoría, sino que, de hecho, es lo suficientemente independiente a menudo para ser llamada 'libre de axiomas. El uso de la frase libre de axiomas ' indica que la definición de isomorfismo depende únicamente del carácter teórico establecido de los modelos de una teoría. Por lo tanto, dos teorías cuyos modelos tienen el mismo carácter teórico, pero cuyos axiomas sustantivos son bastante diferentes, utilizarían la misma definición de isomorfismo.

Estas ideas pueden ser más definidas dando la definición de isomorfismo para álgebras. En este caso, una estructura $(A,\circ,^{-1},e)$ es un álgebra si A es un conjunto no vacío, $\circ$ es una operación binaria de A×A a A, e es un elemento de A, y $^{-1}$ es una operación unaria de A a A.

Definición 1. Un álgebra $\mathfrak{U} = (A,\circ,^{-1},e)$ es isomórfico a un álgebra $\mathfrak{U}' = (A',\circ',^{-1\prime},e')$ si existe y sólo si existe una función f tal que

(i) el dominio de f es A y el rango de f es A',

(ii) f es una función uno-uno,

(iii) Si a y b están en A, entonces $f(a\circ b)=f(a)\circ' f(b)$,

(iv) si a está en A, entonces $f(a^{-1})=f(a)^{-1\prime}$,

(v) $f(e)= e'$.

Cuando nos preguntamos si dos objetos distintos tienen la misma estructura, obviamente preguntamos en relación con algún conjunto de conceptos bajo el cual caen los objetos. Es fácil demostrar que la relación del isomorfismo recién definido es una relación de equivalencia entre álgebras, es decir, es reflexiva, simétrica y transitiva. Como ejemplo bastante interesante, podríamos considerar dos grupos distintos pero isomórficos que tienen aplicación en la teoría de la medición. Deje que un grupo sea el grupo aditivo de enteros. En este caso, el conjunto A es el conjunto de todos los enteros, la operación $\circ$ es la operación de adición, la operación inversa $^{-1}$ es la operación negativa y el elemento de identidad e es 0. Como segundo grupo, isomórfico al primero, considere el grupo multiplicativo de todas las potencias enteras de 2. En este caso, el conjunto A es el conjunto de todos los números que son iguales a 2 a alguna potencia entera, la operación $\circ'$ es la operación de multiplicación, la operación inversa es la operación recíproca estándar, es decir, la inversa de x es 1/x, y el elemento de identidad es el entero 1. Para establecer el isomorfismo de los dos grupos $\mathfrak{U} = (A,+,-,0)$ y $\mathfrak{U}' = (A',\cdot,^{-1},1)$, podemos utilizar la función f de modo que para cada entero n en el conjunto A

$f(n)=2^n$.

Entonces es fácil comprobar que el rango de f es A', que f es uno-uno, y

$f(m \circ n) = f(m + n) = 2^{m+n} = 2^m . 2^n$ $f(m). f(n) = f(m) \circ' f(n)$

$f(n^{-1}) = f(-n) = 2^{-n} = 1/2^n = f(n)^{-1'}$

y $\qquad f(0) = 2^0 = 1$.

Debe ser evidente que el mismo isomorfismo entre los grupos aditivos y multiplicativos es posible si dejamos que el conjunto de objetos del grupo aditivo sea el conjunto de todos los números reales, positivos o negativos, y el conjunto de objetos del grupo multiplicativo sea el conjunto de todos los números reales positivos. Desde el punto de vista de la teoría de la medición, este isomorfismo es de interés principalmente porque significa que no hay una base matemática para elegir entre representaciones aditivas y multiplicativas.

Al tratar de caracterizar la naturaleza de los modelos de una teoría, la noción de isomorfismo entra de una manera central. Tal vez la mejor y más fuerte caracterización de los modelos de una teoría se expresa en términos de un teorema de representación significativo. Como se describió informalmente, por un teorema de representación para una teoría se entiende lo siguiente. Se muestra que una cierta clase de modelos de una teoría, distinguida por alguna razón conceptual intuitivamente clara, ejemplifica dentro del isomorfismo todos los modelos de la teoría. Más precisamente, que Ɱ sea el conjunto de todos los modelos de una teoría, y que β sea un subconjunto distinguido de Ɱ. Un teorema de representación para Ɱ con respecto a β consistiría en la afirmación de que dado cualquier modelo M en Ɱ existe un modelo en β isomórfico a M. En otras palabras, desde el punto de vista de la teoría, cada variación posible del modelo se ejemplifica dentro del conjunto restringido β. Debe ser evidente que un teorema de representación trivial siempre puede ser probado tomando β = Ɱ. Un teorema de representación es tan interesante como la importancia intuitiva de la clase β de los modelos y no más.

Homomorfismo de los modelos. En muchos casos, dentro de matemáticas puras un teorema de representación en términos de isomorfismo de modelos resulta ser menos interesante que un teorema de representación en términos de la noción más débil de homomorfismo.

Un buen ejemplo de este tipo es proporcionado por las teorías de la medición, y la generalización del isomorfismo al homomorfismo se puede ilustrar en este contexto. Cuando consideramos las prácticas generales de medición es evidente que, en términos de la noción estructural de isomorfismo, pensaríamos, en su punto, que el isomorfismo se establece entre un modelo empírico de la teoría de la medición y un Modelo. Por un modelo empírico nos referimos a un modelo en el que el conjunto básico es un conjunto de objetos empíricos y por un modelo numérico en el que el conjunto básico es un conjunto de números. Sin embargo, como un examen ligeramente más detallado de la pregunta indica que rápidamente surgen dificultades sobre el isomorfismo. En demasiados casos de medición, a los objetos físicos distintos se les asigna el mismo número y, por lo tanto, la relación uno-uno necesaria para el isomorfismo de los modelos no se mantiene. Afortunadamente, este es el único respeto en el que debemos cambiar la noción general, para obtener un relato adecuado de las teorías de medición de la relación entre los modelos empíricos y numéricos. La noción general de homomorfismo está diseñada para adaptarse exactamente a esta situación. Para obtener la definición formal de homomorfismo para dos álgebras como se definió anteriormente, sólo necesitamos eliminar el requisito de que la función que establece el isomorfismo sea uno-uno. Cuando esta función es muchas-uno pero no uno-uno, tenemos un homomorfismo que no es un isomorfismo.

1.2.- Invariancia en las teorías de la medición

En relación con cualquier propiedad medida de un objeto o conjunto de objetos, se puede preguntar qué tan único es el número asignado para medir la propiedad. Por ejemplo, la masa de un guijarro se puede medir en gramos o libras. El número asignado para medir la masa es único una vez que se ha elegido una unidad.

La medición de la temperatura en ◦C o ◦F tiene características diferentes. Aquí se elige arbitrariamente un origen y una unidad. Otros tipos formalmente diferentes de medición son ejemplificados por:

(1) la medición de la probabilidad, que es absolutamente única, y

(2) la medición ordinal de propiedades físicas tales como la dureza de los minerales, o propiedades psicológicas como la inteligencia y prejuicios raciales.

El uso de estos diferentes tipos de transformaciones es básico para la idea principal de este capítulo. Una hipótesis empírica, o cualquier declaración de hecho, que utiliza cantidades numéricas es empíricamente significativo sólo si su valor de verdad está en variante bajo las transformaciones apropiadas de las cantidades numéricas involucradas. Como ejemplo, supongamos que un psicólogo tiene una medida ordinal de coeficiente intelectual, y piensa que los núcleos S(a) en una determinada nueva prueba T tienen un significado ordinal en la clasificación de la capacidad intelectual de las personas. Supongamos además que es capaz de obtener las edades A (a) de sus pacientes. La pregunta entonces es: ¿Debería considerar la siguiente hipótesis como empíricamente significativa?

HIPOTESIS 1. Para cualquier sujeto a y b, si $S(a)/A(a) < S(b)/A(b)$, entonces $I.Q.(a) < I.Q.(b)$.

Desde el punto de vista de la caracterización en la varianza del significado empírico, la respuesta es negativa. Para ver esto, deje que $I.Q.(a) \geq I.Q.(b)$, deje $A(a) = 7$, $A(b) = 12$, $S(a) = 3$, $S(b) = 7$. No realice transformaciones en los datos de I.Q. y no realice transformaciones en los datos de edad. Pero vamos a hacer una transformación creciente ϕ que lleva 3 en 6 y 7 en sí mismo. Entonces tenemos

$3/7 < 7/12$,

pero

$6/7 \geq 7/12$,

y el valor de la verdad de la Hipótesis 1 no es variante bajo ϕ.

Lo empíricamente significativo de la característica de transformación de una cantidad es que expresa en forma precisa lo único que es el isomorfismo estructural entre las operaciones empíricas utilizadas para obtener una medición determinada y las correspondientes operaciones o relaciones aritméticas. Si, por ejemplo, la operación empírica es simplemente la de ordenar un conjunto de objetos según alguna característica, entonces la relación aritmética correspondiente es la de menor (o mayor que), y dos funciones que asignan los objetos en números en un preservar el orden empírico son adecuados.

Entonces es fácil mostrar que, si f_1 y f_2 son adecuados en este sentido, entonces están relacionados por una transformación monótono -aumento. Sólo aquellas operaciones y relaciones aritméticas que están en variante bajo transformaciones monótono -aumentando tienen algún significado empírico en esta situación.

Normalmente, un teorema de representación debe ir acompañado de un teorema de invariancia coincidente que indique el grado en que una representación de una estructura es única. En los casos matemáticamente simples y directos es fácil identificar al grupo como un grupo conocido de transformaciones. Para estructuras más complicadas, por ejemplo, estructuras que satisfacen los axiomas de una teoría científica, puede ser necesario introducir aparatos más complejos, pero el objetivo es el mismo, remolcarlo, caracterizar conceptos significativos en términos de varianza.

Una nota para evitar confusiones: es cuando los conceptos se dan en términos de la representación, por ejemplo, una representación numérica en el caso de la medición, o la representación en términos de coordenadas cartesianas en el caso de la geometría, que la prueba para la varianza es necesario. Cuando se dan relaciones puramente cualitativas, que se definen en términos de los primitivos cualitativos de una teoría, por ejemplo, las de la geometría euclidiana, entonces se deduce a la vez que las relaciones definidas son invariables y, por lo tanto, significativas. Por otro lado, la gran importancia de las representaciones es la reducción en los cálculos y la notación que logran, así como la comprensión de la estructura. Esto hace imperativo que tengamos una concepción clara de la varianza y el sentido de las representaciones que pueden estar, en apariencia, bastante alejadas de las estructuras cualitativas que constituyen modelos de la teoría.

1.3.- Escalas de medición

El recuento es un ejemplo de una escala absoluta. El número de miembros de una colección determinada de objetos se determina de forma única. No hay elección arbitraria de una unidad o cero que hacer. Por el contrario, la medición de la masa o el peso es un ejemplo de una escala de relación. Cualquier procedimiento empírico para medir la masa no determina la unidad de masa. La elección de una unidad es una decisión empíricamente arbitraria tomada por un individuo o grupo de individuos. Por supuesto, una vez que se ha elegido una unidad de medida, como el gramo o la libra, la masa numérica de todos los demás objetos del universo se determina de manera única. Otra forma de afirmar esto es decir que la medición de la masa es única hasta la multiplicación por una constante positiva. (El uso técnico de 'hasta' se aclarará más adelante.) La medición de la distancia es un segundo ejemplo de medición de este tipo. La relación entre la distancia entre Palo Alto y San Francisco a la distancia entre Washington y Nueva York es la misma si la medición se realiza en millas o kilómetros.

Para evitar ciertos malentendidos comunes, se necesita amplificación de la afirmación de que ningún procedimiento empírico para medir la masa determina la unidad de masa. Un químico, midiendo una muestra de cierta sal férrica en una balanza de brazos iguales, con una serie estándar de pesos métricos, podría encontrar esta afirmación sorprendente, ya que podría suponer que la selección de una serie estándar de pesos métricos se había fijado como parte de su procedimiento de un gramo como unidad de medida. Hay al menos dos líneas argumentales que deberían resultar efectivas para convencer al químico de que su suposición era incorrecta. En primer lugar, sería pertinente señalar que exactamente la misma información podría expresarse mediante la conversión de esta medida final en una medida en libras u onzas. Para expresar la medición en esta última forma, no habría que realizar más operaciones empíricas con la balanza de brazos iguales. Pero, hay que admitir, el químico bien podría responder que, aunque no había que realizar más operaciones empíricas con la balanza actual, el uso del factor de conversión de gramos a libras implica apelar a las operaciones empíricas realizadas anteriormente por alguna Oficina de Normas al determinar el factor de conversión. Un análisis de su réplica nos lleva a la segunda línea argumental, que va más allá y es más fundamental. Para empezar, su apelación a operaciones empíricas anteriores en otras balanzas puede ser revertida en él, para justificar el etiquetado de su medición con su serie estándar dada como una medida en gramos; También debe recurrirse a las operaciones empíricas anteriores, a saber, las que constituían la calibración de su serie de pesos como una serie métrica estándar. El punto importante es que las operaciones empíricas realizadas por el propio químico no establecen más o menos que la relación de la masa de la muestra de sal férrica con un subconjunto de pesos en su serie estándar. Y se puede hacer el mismo tipo de declaración de relación sobre las operaciones empíricas que llevaron a la calibración de su serie estándar por los técnicos de la firma que produjo la serie. En otras palabras, la declaración del químico:

(1) Esta muestra de sal férrica pesa 1.679 gramos

Puede sustituirse por la declaración:

(2) La relación entre la masa de esta muestra de sal férrica y el peso gramo de mi serie estándar es de 1.679, y el fabricante de mi serie ha certificado que la relación entre mi peso gramo y la masa de kilogramo estándar de aleación de platino - iridio en la Oficina Internacional de Pesos y medidas, cerca de París, es .0010000.

La medición de la temperatura es un ejemplo de un tercer tipo de medida formalmente distinto mencionado anteriormente. Un procedimiento empírico para medir la temperatura mediante el uso de un termómetro no determina ni una unidad ni un origen. En este tipo de medición, la relación de dos intervalos cualquiera es independiente de la unidad y el punto cero de medición. Por razones obvias, las mediciones de este tipo se denominan escalas de intervalo. Ejemplos distintos de la medición de la temperatura son las mediciones de fechas temporales, posición lineal o utilidad cardinal.

En cuanto a la noción de escalas absolutas, de relación e intervalos, podemos formular el segundo problema fundamental para cualquier análisis exacto de un procedimiento de medición: determinar el tipo de escala de las mediciones resultantes de la aplicación del procedimiento. La noción general de una escala no es algo que necesitamos definir de manera exacta para los desarrollos posteriores. Con el fin de sistematizar parte de la discusión del problema de unicidad, podemos definir una escala como una clase de procedimientos de medición que tienen las mismas propiedades de transformación. Ya se han mencionado ejemplos de tres escalas diferentes, a saber, contar como una escala absoluta, la medición de la masa como una escala de relación y la medición de la temperatura como una escala de intervalo.

Las escalas de dureza de Moh, según las cuales los minerales se clasifican en cuanto a dureza determinada por una prueba de arañazos, y la escala de viento de Beaufort, por la que la fuerza de un viento se clasifica como calma, aire ligero, brisa ligera, etc., son ejemplos de un cuarto tipo débil de Escala. Las ciencias sociales abundan con tales escalas ordinales, cuyo significado se discute a continuación.

Los números también se utilizan a veces para la clasificación pura. Por ejemplo, en algunos estados el primer número de una licencia de automóvil indica el condado en el que vive el propietario. La asignación de números de acuerdo con dicha escala es arbitraria excepto para la asignación del mismo número a personas en el mismo condado, y números distintos a personas en condados distintos. Esta escala más débil es una en la que los números se utilizan simplemente para nombrar un objeto o persona. La asignación es arbitraria. Los números de borrador y los números de jugadores de fútbol son ejemplos. Estas escalas se denominan generalmente escalas nominales.

Hemos distinguido, de forma intuitiva, cinco tipos de escalas. En las páginas siguientes, confinaremos principalmente nuestra discusión a un análisis de las cuatro primeras. Sin embargo, no son la única escala de medición, y en ocasiones mencionaremos a las demás.

Ahora queremos caracterizar cada una de estas cinco escalas en términos de sus propiedades de transformación. Para futuras referencias, cada una de las cinco transformaciones mencionadas está formalmente definida. Para empezar, una escala absoluta es única para la transformación de identidad.

DEFINICION 2. La transformación de identidad en el conjunto de números reales es la función f de tal forma que para cada número real x, $f(x) = x$.

Hasta ahora, contar ha sido nuestro único ejemplo de escala absoluta. Una escala de relación es única hasta una transformación de similitud.

DEFINICION 3. Deje f ser una función de valor real cuyo dominio es el conjunto de números reales. Entonces f es una transformación de similitud si y sólo si existe un número real positivo α, tal que para cada número real x

$$f(x)=\alpha x.$$

La medición de la masa y de la distancia han sido nuestros dos ejemplos de escalas de relación. Una escala de intervalo es única hasta una transformación lineal.

DEFINICION 4. Deje f ser una función de valor real cuyo dominio es el conjunto de números reales. A continuación, f es una transformación lineal si y sólo si hay un número positivo α y un número β de tal manera que para cada número x

$$f(x)=\alpha x+ \beta.$$

Si en la medición de la temperatura deseamos convertir x en grados Fahrenheit a Celsius utilizamos la transformación lineal definido por $\alpha = 5/9$ y $\beta = = -160/9$. Es decir

$$y = 5/9(x-32) = 5/9x-160/9.$$

Obviamente, cada transformación de similitud es una transformación lineal con el valor de $\beta = 0$. Una escala ordinal es única hasta una transformación monótona.

DEFINICION 5. Deje f ser una función de valor real cuyo dominio es un conjunto de números reales. A continuación, f es una transformación monótona si y sólo si f es una transformación de aumento monótona o una transformación que disminuye la monótona, es decir, si $x < y$ luego $f(x) < f(y)$ –monótona aumentando, y si $x<y$ luego $f(x) > f(y)$ – monótona disminuyendo.

El análisis clasificatorio de esta sección se resume en el Cuadro 1.

2.- MODELOS DE MEDIDA IGUALMENTE ESPACIADOS

En esta sección se consideran primero algunos de los ejemplos no triviales más simples de estructuras de medición. Los conjuntos básicos de objetos o estímulos serán en todos los casos finitos, y la adecuación de los axiomas elementales para varias estructuras depende en gran medida no finita de esta. Además de su condición finita, la característica distintiva de las estructuras consideradas es que los objetos están igualmente espaciados en un sentido apropiado a lo largo del continuo, por así decirlo, de la propiedad que se está midiendo. Las restricciones de su condición finita y el espaciado igual simplifican enormemente las matemáticas de la medición, pero afortunadamente no es el caso de que la simplificación vaya acompañada de una separación total de las aplicaciones empíricas realistas. La condición no finita y el espaciado igual son las propiedades características de muchas escalas estándar, por ejemplo, la regla ordinaria, el conjunto de pesos estándar utilizados con la balanza de brazos iguales en el laboratorio, o casi la mayoría de los medidores familiares para medir la presión, temperatura o corriente eléctrica.

Tabla 1. Clasificación de escalas y medición

Escala	Propiedades de transformación	Ejemplos
Absoluto	Identidad	Conteo, frecuencia relativa
Cociente	Similitud (Multiplicación por un número positivo)	Masa, distancia, corriente eléctrica, tensión
Intervalo	Lineal (multiplicación por un número positivo y adición de un número arbitrario)	Temperatura, energía potencial, posición lineal, utilidad cardinal
Ordinal	Aumento de monotono o monótono	Escala de Moh, escala eólica Beaufort, preferencias cualitativas
Nominal	1-1	Números de teléfono, números de Seguro Social

2.1.- Medición extensiva

Los axiomas de medición extensa se desarrollan en esta sección con tres interpretaciones específicas en mente. Uno es para la medición de la masa en una balanza de brazos iguales, uno es para la medida de la longitud de las varillas rígidas, y uno es para la medición de probabilidades subjetivas. Otras interpretaciones son ciertamente posibles, pero las observaciones detalladas se limitan a estas tres.

Desde un punto de vista formal, las estructuras básicas son triples, (Ω, Ƒ ϒ), donde Ω es un conjunto vacío, Ƒ es una familia de subconjuntos de Ω y la relación ϒ es una relación binaria en Ƒ. Mediante el uso de subconjuntos de Ω como objetos, evitamos la necesidad de un concepto primitivo separado de concatenación. Como condición estructural general, se exigirá que Ƒ sea un álgebra de conjuntos en el valor de Ω, que es justo exigir que Ƒ sea no vacío y se cierre bajo la unión y la complementación de los conjuntos, es decir, si A y B están en Ƒ, entonces A ∪ B y -A también están en Ƒ.

La interpretación prevista de los conceptos primitivos para los tres casos mencionados es bastante obvia. En el caso de la masa, Ω es un conjunto de objetos físicos y para dos subconjuntos A y B, A ϒ B si y sólo si el conjunto A de los objetos se juzga al menos tan pesado como el conjunto B. Probablemente vale la pena destacar que varios usos diferentes del balance sin igual, son apropiados para llegar a un juicio de comparación. Por ejemplo, si A = {a, b} y B = {a, c} no será posible literalmente poner A en una panorámica de la balanza y simultáneamente B en la otra, porque el objeto a es un miembro de ambos conjuntos. Pero podemos hacer la comparación de al menos dos maneras diferentes. Uno es simplemente comparar las partes no superpuestas de los dos subconjuntos, que en el presente caso se reduce a la comparación de b y c. Un procedimiento empírico bastante diferente que incluso elimina la necesidad de que la balanza sea el mismo brazo, es primero simplemente equilibrar A con arena en el otro mango (o posiblemente agua; pero en caso de que, arena o agua en recipientes pequeños), y luego comparar B con esta cantidad fija de arena. Dado el significado estándar del conjunto, operaciones teóricas de intersección, unión y complementación, no se requiere ninguna interpretación adicional de estas operaciones, incluso de unión de conjuntos, que sirve como operación de concatenación.

En el caso de las varillas rígidas, el conjunto Ω es sólo la colección de varillas, y A ϒ B si y sólo si el conjunto A de varillas, cuando se coloca de extremo a extremo en una línea recta, se juzga más tiempo que el conjunto B de varillas también así dispuesto. Las variaciones sobre exactamente cómo se va a hacer esta comparación cualitativa de la longitud se pueden suministrar fácilmente.

En el caso de probabilidades subjetivas o propensiones objetivas, el conjunto Ω es el conjunto de posibles resultados del experimento o de la situación empírica que se está considerando. Los subconjuntos de Ω en Ƒ son sólo eventos en el sentido ordinario de los conceptos de probabilidad, y A ϒ B si y sólo si A se juzga al menos tan probable como B.

Los axiomas para la medición extensiva, sujetos a las dos restricciones de finitud y el espaciado igual, se indican en la siguiente definición. En la definición, y posteriormente, utilizamos las definiciones estándar para la equivalencia ≈ en términos de un orden débil y también de un orden estricto. Las definiciones son sólo estas: A ≈B si y sólo si A ϒ B y B ϒ A; A ϒ B si y sólo si A ϒ B, y no B ϒ A. solo si ∅ es el símbolo para el conjunto vacío.

Una estructura Ω = (Ω, Ƒ, ϒ) es una estructura extensa finita, igualmente espaciada si y sólo si es un conjunto finito, Ƒ es un álgebra de conjuntos en Ω y se satisfacen los siguientes axiomas para cada A, B, y C en Ƒ:

1. La relación ϒ es un orden débil de Ƒ;
2. Si A∩C =∅ y B∩C =∅, entonces A ϒ B si y sólo si AUC ϒ BUC;
3. A ϒ ∅ ;
4. No ∅ ϒ Ω;
5. Si A ϒ B entonces hay una C en Ƒ de tal manera que A ≈ BUC.

Desde el punto de vista de las ideas estándar sobre la medición de la masa o la longitud, sería natural fortalecer el Axioma 3 para afirmar que si A ≠∅, entonces A ϒ ∅, pero debido a que esto no es necesario para el teorema de representación y es excesivamente restrictivo en el caso de las probabilidades, el axioma más débil parece más apropiado.

Al indicar el teorema de representación, utilizamos la noción de una medida aditiva µ de Ƒ a los números reales, es decir, una función µ de tal manera que, para un y A y B en Ƒ,

i. µ(∅)=0
ii. µ(A)≥0
iii. Si A∩B =∅ entonces µ(A∪B)=µ(A)+µ(B).

TEOREMA 1. Dejar Ω = (Ω, Ƒ, ϒ) sea una estructura finita, igualmente espaciada. Luego existe una medida aditiva, de tal manera que para cada A y B en Ƒ µ(A)≥ µ(B) si y sólo si A ϒ B.

Además, todos los conjuntos individuales a n se dividen como máximo dos clases de equivalencia en Ƒ; si hay dos, una de estas clases de equivalencia contiene el conjunto vacío. La prueba elemental de este teorema y parte de la discusión anterior se encuentra en Suppes [1969, págs. 4–8].

TEOREMA 2. Dejar $\Omega = (A, Ƒ, ϒ)$ ser una estructura finita, igualmente espaciada. Entonces una representación numérica de A es invariable bajo el grupo de transformaciones de similitud del Cuadro 1

Es importante señalar que, para las tres interpretaciones empíricas de los conceptos primitivos utilizados en la teoría de la medición extensiva caracterizada en la Definición 1, faltan muchos procedimientos empíricos importantes necesarios para cada interpretación. A los estudiantes de los laboratorios de ingeniería elemental o física se les enseñan muchos detalles sobre la medición de masa, o el peso si se quiere, con balanzas de brazo no iguales, o la longitud con varillas de medición o cintas. Pero incluso estos detalles son adecuados como un relato de la medición fundamental. Para dicha medición se debe utilizar en una etapa anterior para validar los pesos estándar o varillas utilizadas por los estudiantes. Los procedimientos empíricos son mucho más elaborados para crear un conjunto de pesos estándar, por ejemplo. Los axiomas de la Definición 1 entran en juego en la creación de pesos estándar "iguales" o en la comprobación de que un conjunto determinado de pesos estándar parece satisfactorio. Digo "mismo caso" deliberadamente, porque no hay un fin natural a la investigación empírica de los procedimientos de medición estándar o instrumentación en física u otras ciencias. El arte de crear buenos instrumentos de medición es complicado y sutil, ciertamente así como en la frontera de muchas ciencias. Este arte, he argumentado repetidamente en publicaciones anteriores, no puede describirse adecuadamente en un manual, pero requiere un aprendizaje de formación, muchos de los cuales son no verbales. ¿Te imaginas, por ejemplo, convertirte en un buen tenista simplemente leyendo un libro al respecto o escuchando algunas conferencias? Lo mismo ocurre con cualquier laboratorio o conjunto de habilidades de fabricación necesarias para producir buenos instrumentos de medición.

2.2.- Medición de la diferencia

Refiriéndome a la distinción entre propiedades extensas e intensivas discutida anteriormente, podría fácilmente hacer un caso para dar derecho a esta medición intensiva de subsección, ya que es característica de la medición de la diferencia que ninguna operación corresponde a la adición está presente, y no se postula ninguna combinación significativa de objetos o estímulos para las estructuras de diferencia.

Como antes, el conjunto básico de objetos o estímulos no estará vacío y finito, pero en el caso de las estructuras de diferencia la relación en el conjunto será cuaternaria. Denoto el conjunto básico de objetos por A, y la relación cuaternaria por ϒ. La idea detrás de la relación cuaternaria ϒ es que ab ϒ cd se mantiene cuando, y sólo cuando la diferencia cualitativa (algebraica) entre a, y b es al menos tan grande como la que entre c y d. En el caso de las sentencias de similitud, por ejemplo, la relación ϒ se mantendría cuando el sujeto en un experimento psicológico juzgara que la similitud entre a, y b era al menos tan grande como la similitud entre c y d, teniendo debidamente en cuenta el signo algebraico de la diferencia. La inclusión de la diferencia algebraica requiere cierto cuidado en la interpretación; por ejemplo, en muchos experimentos de similitud un signo algebraico natural no se adjunta a la similitud. Los casos que satisfacen el presente requisito son juicios de utilidad o de tono o de intensidad del sonido; de hecho, cualquier tipo de juicios en los que el sujeto reconozca y acepte que las sentencias se encuentran naturalmente a lo largo de un continuo unidimensional.

Definimos para la relación cuaternaria ϒ al igual que para una relación binaria, ϒ y ≈ :

ab ϒ cd si y solo si no cd ϒ ab,

ab ≈ cd si y solo si ab ϒ cd y cd ϒ ab.

También es conveniente tener a mano ciertas definiciones elementales de la relación binaria de estricta precedencia o preferencia y la relación ≈ de indiferencia o en capacidad distintiva. Estas definiciones son las siguientes.

a ϒ b si y solo si ab ϒ aa (1)

a ≈ b si y solo si ab ≈ ba (2)

Para expresar la parte de igual espaciado de nuestras suposiciones, necesitamos una definición adicional, a saber, la definición que requiere que los objetos adyacentes en el orden estén igualmente espaciados. Para ello introducimos la definición de la relación binaria J. Esta relación binaria es sólo la de predecesor inmediato.

aJb si y solo si a ϒ b y para todo c en A si a ϒ c, entonces cualquier b ≈ ó b ϒ c. (3)

Ahora me dirijo a la definición de estructuras finitas de igualdad de diferencias. Los axiomas dados siguen a los dados por Suppes y Zinnes [1963].

DEFINICION 7. Una estructura cuaternaria Ц = (A, ϒ) es una estructura de diferencia finita, igualmente espaciada si y sólo si A es un conjunto finito y se cumplen los siguientes axiomas para cada a, b, c y d en A:

1.- La relación ϒ es un orden débil de AxA;

2.- Si ab ϒ cd, entonces ac ϒ bd;

3.- Si ab ϒ cd, entonces dc ϒ ba;

4.- Si aJb y cJd, entonces ab ≈ cd.

Teniendo en cuenta las interpretaciones empíricas mencionadas, es fácil comprender la interpretación intuitiva de cada axioma. El primer axioma sólo requiere que la relación cuaternaria ϒ sea un orden débil en términos de la diferencia cualitativa entre objetos o estímulos. El Axioma 2 es el axioma más poderoso y fundamental de muchas maneras. Expresa una simple propiedad necesaria de la interpretación prevista de la relación ϒ. El Axioma 3 sólo expresa un hecho algebraico necesario sobre las diferencias. Nótese que los Axiomas 1–3 son axiomas necesarios. Sólo el Axioma 4 es suficiente pero no necesario; relaciona j con la relación cuaternaria ≈. La idea intuitiva de este axioma es que si un soporte encuentra en la relación J a b, y c se encuentra en la relación J a d, entonces la diferencia entre a y b se juzga como la misma que la diferencia entre c y d, teniendo debidamente en cuenta el signo algebraico. A partir de estos cuatro axiomas podemos probar el siguiente teorema de representación. (Las pruebas de teoremas 3–8 de esta sección se indican en [Suppes, 2002, C. 3–4].)

TEOREMA 3. Deje Ц =(A, ϒ) que un valor de la diferencia sea una estructura de diferencias finita e igualmente espaciada. Luego existe una función de valor real en A tal que por cada a, b, c, y d en A.

φ (a) φ (b) φ ≥ φ(c) – φ(d) si y solo si ab ϒ cd

El teorema de invariancia coincidente es el siguiente.

TEOREMA 4.Deje que Ц =(A, ϒ) sea una estructura de diferencia finita e igualmente espaciada. A continuación, una representación numérica de Ц es invariable bajo el grupo de transformaciones lineales de la Tabla 1.

Tras una inspección ocasional, se podría suponer que los tres primeros axiomas de la Definición 7 caracterizarían todas las estructuras de diferencia todas finitas para las que se podría encontrar una representación numérica. Sin embargo, Scott y Suppes [1958] demostraron que la teoría de todas las estructuras de diferencia finita representables no se caracteriza por estos tres axiomas y de hecho no se puede caracterizar por ninguna simple lista finita de axiomas.

Por otro lado, se podría pensar que, con la adición del Axioma 4 no necesario sería difícil satisfacer los axiomas, porque una colección arbitraria de estímulos u objetos no lo haría. Sin embargo, si los estímulos que se están estudiando se encuentran en un continuo, entonces será posible seleccionar una secuencia estándar que satisfaga los axiomas, tal como se hace en el caso de seleccionar un conjunto estándar de pesos para su uso en un balance de brazos iguales.

2.3.- Medición de la bisección

Las estructuras relacionales estrechamente relacionadas con las estructuras de diferencia finita son las estructuras de bisección Ⴗ = (A, B) donde B es una relación ternaria en el conjunto finito A con la interpretación de que B(a, b, c) si y sólo si b es el punto medio del intervalo entre a y c. El método de bisección tiene una larga historia en psicofísica, pero es importante enfatizar que la satisfacción de los axiomas que se dan a continuación no requiere suposiciones de una medición física subyacente. Todo lo que necesitamos es la idea intuitiva de un continuo cualitativo, e incluso eso no es necesario para fines formales. Después de que se haya realizado la medición psicológica fundamental en términos del método de bisección, es deseable cuando sea posible encontrar una función psicofísica computacionalmente simple que relacione mediciones físicas de la misma magnitud con la psicológica Medidas.

Los axiomas que se indican a continuación para el método de bisección implican una serie de comprobaciones que deben cumplirse antes de afirmar que existe una función de representación numérica, pero estas comprobaciones a menudo se han ignorado en la literatura experimental que los informes de uso de la método de bisección. Para el conjunto más simple de axiomas y definiciones, tomamos tanto la relación de bisección B como la relación de ordenación ϒ como primitiva, pero es fácil de eliminar ϒ por definición. Utilizamos la relación binaria J como se definió anteriormente (Ecuación 3).

DEFINICION 8. Una estructura Ц= (A, ϒ, B) es una estructura de bisección finita, igualmente espaciada si y sólo si el conjunto A es finito y se cumplen los siguientes axiomas para cada a, a', b, c y c' en A:

1. La relación ϒ es un orden débil de A;
2. Si B(abc) y B(abc') entonces c ≈ c';
3. Si B(abc) y B(a'bc) entonces a ≈ a';
4. Si B(abc) entonces a ϒ b and b ϒ c;
5. Si aJb y bJc entonces B(abc);
6. Si B(abc) y a'Ja y cJc' entonces B(a'bc').

La interpretación intuitiva de los axiomas es relativamente transparente. El primer axioma ya es familiar. Los axiomas 2 y 3 requieren la unicidad de los puntos finales hasta la equivalencia, que separa claramente la bisección de la relación. El Axioma 4 relaciona la relación de bisección ternaria y la relación de ordenación binaria de una manera natural, aunque impone una restricción formal a la relación de bisección que a menudo se omitiría. La inclusión de esta propiedad de orden, como parte de la relación B simplifica los axiomas. El Axioma 5 es una fuerte suposición de espaciado igual, y el Axioma 6 expresa una característica adicional de este espaciado igual. En vista de los axiomas dados anteriormente para las estructuras de diferencia, es algo sorprendente que el Axioma 6 pueda ser y satisfacer todos los primeros cinco axiomas.

B(abc) si y sólo si aJb y bJc

El teorema de representación asume la siguiente forma.

TEOREMA 5.Deje que Ц = (A, ϒ, B) sea una estructura de bisección finita igualmente espaciada. Luego existe una función de valor real - definida en A tal que para cada a, b, y c en A

(i) $\varphi(a) \geq \varphi(b)$ si y solo si a b,
(ii) $2\varphi(b)=\varphi(a)+\varphi(c)$ y $\varphi(a) > \varphi(b) > \varphi(c)$ si y solo si B(a, b, c).

El teorema de invariancia coincidente es el siguiente:

TEOREMA 6. Deje que Ц = (A, ϒ, B) sea una estructura de bisección finita. A continuación, una representación numérica de Ц es invariable bajo el grupo de transformaciones lineales de la Tabla 1.

2.4.-. Medición conjunta

En muchos tipos de entornos experimentales u observacionales, resulta ser el caso de que la medición de una sola magnitud o propiedad no es factible o teóricamente interesante. Lo que es de interés es la medición conjunta de varias propiedades simultáneamente. En este caso consideramos axiomas para la medición conjunta aditiva. La representación prevista es que usemos pares ordenados de objetos o estímulos. Los primeros miembros de los pares se extraen de un conjunto y, en consecuencia, representan un tipo de propiedad o magnitud. Los segundos miembros de los pares son objetos dibujados de un segundo conjunto que representa una magnitud o propiedad diferente. Dada la estructura del par ordenado, sólo exigiremos juicios de si un par tiene o no un par conjunto más del atributo 'conjunta' que un segundo par.

Es fácil dar ejemplos de interpretaciones para las que esta forma de ver los pares ordenados es natural. Supongamos que se nos pide que juzguemos las capacidades de las personas para asumir una posición de liderazgo en una organización. Lo que se nos da sobre las personas son evaluaciones de sus conocimientos técnicos en una escala ordinal y una medida de carisma en una escala ordinal. Por lo tanto, para cada individuo podemos decir cómo se compara en cada escala con cualquier otro individuo. El problema es hacer juicios entre los individuos en términos de sus capacidades generales. Los axiomas que se indican a continuación indican el tipo de condiciones ordinales conjuntas adicionales que son suficientes para garantizar una medición conjunta finita igualmente espaciada, donde en este caso, el espaciado igual está a lo largo de cada dimensión.

Como segundo ejemplo, un par (a, p) puede representar un tono con intensidad a y frecuencia p, y el problema es juzgar cuál de los dos tonos suena más fuerte. Por lo tanto, el sujeto juzga (a, p) ϒ (b, q) si y sólo si el tono (a, p) parece al menos tan fuerte como (b, q). Otros ejemplos de disciplinas tan ampliamente separadas como la economía y la física se dan fácilmente, y se discuten con considerable detalle en Krantz et al. [1971, Ch.6

Hay que subrayar que las representaciones adictivas deben hacerse en esta sección es un caso especial. Las generalizaciones de aditivamente se discuten en la referencia que acaba de citar. También hay que señalar que la restricción en esta sección a los pares ordenados en lugar de las n duplas ordenadas, no es esencial.

Antes de pasar a los axiomas de la medición conjunta (aditiva), necesitamos un par de definiciones elementales que nos permitan definir relaciones de orden en los componentes individuales. Sobre la base de axiomas sobre las relaciones de orden entre pares, podremos demostrar que estas relaciones de orden sobre los componentes son también débiles. En las siguientes definiciones elementales A_1 es el conjunto de primeros componentes y A_2 el conjunto de segundos componentes. Por lo tanto, cuando se hace referencia a un par ordenado (a, p), se entiende que a está en A_1 y p está en A_2.

En cuanto a esta relación, definamos a ϒ b y a≈ b de la manera habitual. Además, se necesita una definición similar para el segundo componente.

a ϒ b si y solo si para todo p en A_2, (a, p) ϒ (b, p). (4)

También utilizamos la notación ya introducida para la relación ϒ en $A_1 \times A_2$, a saber, (a, p) ϒ (b, q) si y sólo si no (b, q) ϒ (a, p), y (a, p) ≈ (b, q) si y sólo si (a, p) ϒ (b, q) y (b, q) ϒ (a, p). Los axiomas para la medición conjunta aditiva en el caso finito e igualmente espaciado se encarnan en la siguiente definición.

p ϒ q si y solo si para todo a en A_1, (a, p) ϒ (a, q). (5)

DEFINICION 9. Una estructura (A_1, A_2, ϒ) es una estructura conjunta de aditivos finitos, igualmente espaciada, si y sólo si los conjuntos A_1 y A_2 son finitos y se cumplen los siguientes axiomas para cada a y b en A_1 y cada p y q en A_2:

1. La relación ϒ es de orden débil en $A_1 \times A_2$;
2. Si (a, p) ϒ (b, p) entonces (a, q) ϒ (b, q);
3. Si (a, p) ϒ (a, q) entonces (b, p) ϒ (b, q);
4. Si aJb and pJq entonces (a, q)≈(b, p).

El contenido intuitivo de los cuatro axiomas de la Definición 9 es evidente, pero requiere cierta discusión. El Axioma 1, por supuesto, es el requisito familiar de un orden débil. Los axiomas 2 y 3 expresan una condición de independencia de un componente del otro. Por lo tanto, el Axioma 2 dice que si el par (a, p) es al menos tan grande como el par (b, p) entonces la misma relación se mantiene cuando p es reemplazado por cualquier otro miembro q de A_2, y el Axioma 3 dice lo mismo sobre el segundo componente. El Axioma 4 es suficiente pero no necesario. Indica la suposición de espaciado igual y corresponde estrechamente al axioma correspondiente para las estructuras de diferencia finita, igualmente espaciadas.

Se podría pensar que la suposición de monotonía que si (a, p) ≈ (b, q) y a ϒ b, entonces q ϒ p, también necesita ser asumido como un axioma, pero esta suposición adicional no es necesaria: se puede probar sólo desde los primeros cuatro axiomas. La declaración del teorema de representación, a la que ahora nos dirigimos, asume exactamente la forma esperada. Lo único a tener en cuenta es que las dos funciones de valor real en cada componente se sueldan juntas por la misma unidad. Esto se refleja en el cambio común de unidad en el teorema, pero se permite un origen diferente.

TEOREMA 7. Deje (A_1, A_2, ϒ) sea una estructura conjunta de aditivos finitos, igualmente espaciada. Luego existen funciones de valor real φ_1 y φ_2 en A_1 y A_2 respectivamente, de tal manera que para a y b en A_1 y p y q en A_2

$\varphi_1(a)+\varphi_2(q)\geq \varphi_1(b)+\varphi_2(p)$ si y solo si (a, q)(b, p).

Vale la pena señalar que el siguiente teorema en varianza (Teorema 8) tiene una interpretación geométrica natural. Si pensamos en las funciones de los pares de mapeo 1 y 2 en el plano cartesiano, entonces el teorema de singularidad dice que en el sentido geométrico estándar, cualquier cambio de escala debe ser uniforme en todas las direcciones, pero el origen puede ser traducido por una distancia diferente a lo largo de los diferentes ejes.

TEOREMA 8. Dejemos (A_1, A_2,) una estructura conjunta aditiva finita no trivial igualmente espaciada. A continuación, una representación numérica (φ_1, φ_2) es invariable hasta el grupo de pares (f_1, f_2) de transformaciones lineales de (φ_1, φ_2), pero con la restricción de que f1 y f2 tienen una constante multiplicativa común, es decir, hay números de α, β, y ɏ tal que

$F_1 \circ \varphi_1 = \alpha\varphi_1 + \beta$ and $f_2 \circ \varphi_2 = \alpha\varphi_2 + ɏ$

(El requisito en el teorema de que la estructura sea no trivial es sólo que tanto A_1 como A_2 cada uno tiene dos elementos distintos que no son equivalentes bajo el ordenamiento.)

3.- EXTENSIÓN Y APROXIMACIÓN DE LA MEDICIÓN EXTENSIVA

3.1.- Ampliación del caso finito

Comenzamos con tres primitivos: un conjunto en vacío A, una relación binaria en A, y una operación binaria cerrada o que asigna A×A en A. La interpretación es: A es un conjunto de objetos o entidades que exhiben el atributo en cuestión; a◦b se mantiene si y sólo si una exhibe, de alguna manera cualitativa prescrita, al menos tanto del atributo como b; y a-b es un objeto en A que se obtiene concatenando (o componiendo) a y b de alguna manera prescrita y sistemática. Un ejemplo es la medición del peso (véase Kisch [1965] para un historial detallado de métodos y equipos) en el que los elementos de A son objetos materiales; a◦b se establece colocando a y b en las dos platos de una balanza de brazos iguales y observando qué plato cae; y a-b significa que a y b se colocan en el mismo plato con una debajo de b.

Como antes, escribimos a ≈ b si y sólo si a ¥ b y b ¥ a y a ϒ b si y sólo si a ¥ b y no (b ¥ a).

DEFINICION.10.- Deje A ser un conjunto vacío, ¥ es una relación binaria en A, y ₒ a una operación binaria en A. El triple (A, ¥ , o) es una estructura extensa cerrada si se cumplen los siguientes cuatro axiomas para todos a, b, c, d ϵ A:

(i) Orden débil: (A, ¥) es un orden débil, i.e., ¥ es una relación reflexiva, transitiva y conectada.

(ii) Asociatividad débil: a◦(b◦c)≈(a◦b)◦c.

(iii) Monotonidad: a ¥ b si a◦c ¥ b◦c si c◦a ¥ c◦b.

(iv) Arquímedes: si a ϒ b, entonces para cualquier c, d ∈ A, existe un entero positivo n tal que na◦c ¥ nb◦d, mientras que se define inductivamente como: 1a = a, (n +1)a = na◦a.

La estructura se denomina positiva si, además, satisface

(v) (v) Positivity: a◦b ϒ a.

TEOREMA 9. Deje A ser un conjunto no vacío, una relación binaria en A, y ◦ a operación binaria cerrada en A entonces (A, ¥ , o) es una estructura extensa cerrada si existe una función de valor real ϕ en A(ϕ : A →Re) de tal forma que para todos a, b,∈ A

(i) a ¥ b Si ϕ(a) ≥ ϕ(b);

(ii) ϕ (a◦b) = ϕ(a)+ϕ(b).

Otra función ϕ satisface (i) and (ii) si existe α>0 tal que ϕ = αϕ. La estructura es positiva si para todos a ∈ A, ϕ(a) > 0.

Los axiomas de la Definición 10 y la prueba del Teorema 9 se toman de Krantz et al. [1971, Ch.3].

3.2.- Aproximación cualitativa con medidas superiores e inferiores y transitivas en distinguibilidad

La consideración psicológica de los umbrales siguientes, para los que las sentencias perceptivas u otras comparativas son difíciles, si no imposibles, fue iniciada por Fechner [1860/1966]. Wiener (1921) dio un importante análisis matemático temprano. Gran parte de la literatura moderna comienza con la definición de Luce [1956] de un semi orden, que fue axiomatizada como una sola relación binaria en el caso finito por Scott y Suppes [1958]. Algunas de las contribuciones más significativas han sido de Falmagne [1971; 1974; 1977; 1985]. El análisis probabilístico de los umbrales data al menos de las obras de Thurstone [1927a; 1927b]. Falmagne [1976; 1978] también ha sido un contribuyente central a este enfoque, con una serie de otros artículos escritos con colegas: Falmagne e Iverson [1979], Falmagne et al. [1979], e Iverson y Falmagne [1985]. Una extensa revisión de toda esta literatura se da en Suppes et al. [1989, Ch. 16].

Casi todo el trabajo al que se hace referencia supone que la distinción de eventos, objetos o estímulos similares es una relación transitiva. La suposición implícita es que con muchas observaciones discriminantes diferentes, muchas inicialmente en respiraderos electrónicos distinguibles pueden estar separadas. Aquí lo contrario es el punto de partida y la razón del uso de la palabra "transitivo" en el título. Es una consecuencia de los axiomas introducidos que en la distinción es una relación de equivalencia, y por lo tanto, transitivo. El resto de esta sección se basa en gran medida en Suppes [2006].

En la sección anterior revisé brevemente una medición extensa centrada en la construcción de una representación de relación de escala estándar finita. La base de la distinción transitiva ahora es fácil de explicar. Un objeto pesado se asigna a un intervalo mínimo único, por ejemplo, uno entre 1,9 g y 2,0 g. La relación binaria de dos objetos, a y b, no parte de la secuencia estándar, que es equivalente en peso, a b, es que se asignan al mismo intervalo mínimo en la secuencia estándar. Esta relación es obviamente una relación de equivalencia, es decir, reflexiva, simétrica y transitiva, pero en el sistema de aproximación desarrollado, estas propiedades no son directamente comprobables, sino más bien consecuencias de las operaciones de pesaje con estándar ya " calibrado" de pesos.

Por lo tanto, en la notación utilizada más adelante, se dice que un objeto asignado al intervalo mínimo (1,9 g, 2,0 g) tiene, como aproximación, la medida superior (de peso) $w*(a)$= 2.0 g y la medida inferior $w*(a)$=1 .9 g. En la práctica, para todos, excepto para los procedimientos de medición más refinados, no se da ningún análisis estadístico de tener peso en un intervalo tan mínimo. En los casos en que el intervalo mínimo de la secuencia estándar está justo en el límite del rendimiento del instrumento, se puede dar un análisis estadístico para mediciones repetidas.

La práctica ordinaria no está completamente de acuerdo con mi uso de un intervalo mínimo y, por lo tanto, la asignación de un límite superior e inferior como la medida aproximada adecuada. Pero lo que se hace está estrechamente y simplemente relacionado. Como se enseña en los cursos de física elemental, para expresar una medición como "precisa a 0,1 g", por ejemplo, la medida se escribe como 1.9 ± 0.1 g.. Lo que normalmente se recomienda en la práctica es utilizar dos intervalos mínimos adyacentes para reducir la incertidumbre y expresar la medición en sí como un solo número. Los axiomas indicados en la Sección 3 podrían cambiarse fácilmente para acomodar este uso de dos adyacentes en lugar de un intervalo mínimo.

Esta misma notación ± también se utiliza ampliamente para expresar el error estándar estadístico de las mediciones repetidas. Es conceptualmente importante aquí conservar las medidas superior e inferior, ya que la visión fundamental formalizada en los axiomas es que no se dispone de una medición más fina que la de un intervalo mínimo en las circunstancias dadas. Y ninguna construcción teórica de una distribución de probabilidad para la ubicación dentro del intervalo mínimo tiene mucho sentido científico. El punto que se hace hincapié es que la formalización dada está destinada a ser un paso más cercano a mucho, pero ciertamente no a todos, práctica real de medición cuando se dispone de una representación a escala estándar fija.

Como una cuestión de terminología, lo que he llamado una estructura extensa finita igualmente espaciada podría llamarse una estructura extensa de secuencia estándar finita. La terminología de las secuencias estándar es familiar en la literatura sobre los fundamentos de la medición. Este lenguaje sugiere el término útil conjuntos estándar para los conjuntos de ponderaciones que forman una secuencia estándar.

Para su uso posterior es importante tener en cuenta que para dos conjuntos de pesos estándar A y B, si no son equivalentes en peso que la diferencia mínima posible entre ellos es el peso de un conjunto atómico. Más exactamente, el par ordenado de conjuntos (A, B) es un par mínimo de conjuntos estándar si $\mu(A) - \mu(B) = \mu$ (un conjunto atómico), es decir, su diferencia es en realidad el mínimo para conjuntos estándar no equivalentes. Tenga en cuenta que si (A, B) es un par mínimo, A ϒ B. La equivalencia de estos pares es una noción útil para definir. Dos pares mínimos (A, B) y (A’, B’) son equivalentes si $\mu(A) = \mu(A')$ and $\mu(B) = \mu(B')$. Aquí hay tres observaciones que son pertinentes para discusiones posteriores.

(1) Si (A, B) y (C, D) son pares mínimos, entonces $\mu(A) - \mu(B) = \mu(C) - \mu(D)$.

(2) Obviamente, la relación de ordenación ɏ se puede extender a pares mínimos (A,B) and (C,D):

(3) El conjunto vacío ∅ es un conjunto estándar.

(A,B) ɏ (C,D) si A ɏ C,

que podríamos haber utilizado anteriormente para definir pares mínimos equivalentes.

Suponiendo ahora una estructura extensa finita igualmente espaciada (también conocida como una secuencia estándar finita), se dan axiomas adicionales para medir aproximadamente cualquier objeto físico en el rango de la secuencia estándar. Los conceptos primitivos son ahora

(i) Un conjunto Ω de objetos,

(ii) Una familia no vacía Ƒ de subconjuntos de Ω,

(iii) Un subconjunto S of Ω, cuyos elementos forman una secuencia estándar finita,

(iv) Un subconjunto W de los objetos a medir, i.e., W =Ƒ|W − {∅} es la familia de todos los subconjuntos no vacíos de W. (La notación F|W significa que la familia Ƒ subconjunto de subconjuntos de W.)

(v) una relación binaria ⊻ en Ƒ, pero no se supone que es un orden débil de W. Esto se demuestra más adelante. Como antes, definimos: W_1 ϒ W_2 si W_1⊻ W_2 y no W_2 ⊻ W_1. también, $W_1 \approx W_2$ si W_1 ⊻ W_2 y W_2 ⊻ W_1.

Si (S_1 ,S_2) es un par mínimo y S_1ϒ W_1 ϒ S_2,entonces (S_1,S_2) se dice que es un par mínimo para W_1, y también W_1 se dice que tiene un par mínimo.

DEFINICION 11. Una estructura Ω = (Ω, Ƒ, S, W, ⊻) es una estructura extensa aproximada con una secuencia estándar finita si y sólo si W es un conjunto finito no vacío, W⊆Ƒ|W es la familia de todos los subconjuntos no vacíos de W, y los siguientes axiomas están satisfechos para todos los S_1, S_2, S_3 y S_4 in Ƒ|S y todo W_1 y W_2 en W:

1. (S, Ƒ|S, ⊻) es una estructura finita igualmente espaciada;

2. S ∩ W =∅ y S ∪ W =Ω ;

3. W_1 ⊻ W_2 or W_2 ⊻ W_1;

4. Si W_1 ϒ S_1 ϒ W_2 then W_1 ϒ W_2;

5. Si S_1 ϒ W_1 ϒ S_2 then S_1 ϒ S_2;

6. W_1 ϒ S_1 ó S_1 ϒ W_1;

7. Si (S_1, ∅) es un par mínimo entonces W_1 ϒ S_1;

8. Si $W_1 \cap W_2$ =∅, S_1 ϒ W_1 ϒ S_2, S_3 ϒ W_2 ϒ S_4 y $S_1 \cap S_3$ =∅, entonces $S_1 \cup S_3$ ϒ $W_1 \cup W_2$ ϒ $S_2 \cup S_4$;

9. si $W_1 \cap W_2$ =∅ entonces hay conjuntos estándar S_1 y S_2 tal que $S_1 \cap S_2$ = ∅, S_1 ϒ W_1 y S_2 ϒ W_2;

10. Si W_1 ϒ W_2 entonces hay un conjunto estándar S_1 tal que W_1 ϒ S_1 ϒ W_2;

11. W_1 entonces hay un conjunto estándar.

Algunos comentarios sobre estos axiomas son apropiados. El Axioma 1 sólo trae la estructura de los conjuntos estándar dentro del marco de aproximación. El Axioma 2 no requiere superposición de objetos entre los de S, calibrados para conjuntos estándar, y los de W, objetos que se deben pesar. El Axioma 3 es el único axioma expresado puramente en términos de objetos pesados, sin pruebas utilizando pesos estándar. Su requisito de conexión de para W es familiar. Los Axiomas 4–11 formula entonces suposiciones comprobables que son suficientes para justificar la medición aproximada de pesos dentro del rango de conjuntos estándar. Debido a que ambos conjuntos S y W son finitos, cada axioma se puede probar directamente en un equilibrio de brazo igual. Axioma 4 proporciona la prueba para W_1 ser estrictamente más pesado que W_2, a saber, encontrar un S_1 tal queW_1 ϒ S_1 y S_1 ϒ W_2. Axioma 5 establece una condición de transitividad, por así decirlo, sobre la relación entre conjuntos estándar y conjuntos u objetos pesados. Si S_1 es más pesado que W_1 y W_1 es más pesado que S_2, entonces debe ser el caso de que S_1 es más pesado que S_2. El Axioma 6 excluye cualquier objeto pesado W_1 que sea exactamente del mismo peso que cualquier conjunto estándar. Las formas más débiles de este axioma son posibles, pero con las complicaciones de la prueba. El axioma es similar a los axiomas familiares de "elección forzada" en la medición de creencias o acciones. El Axioma 7 requiere que cualquier objeto pesado W_1 sea más pesado que cualquier conjunto estándar positivo mínimo S_1. Este axioma permite que una balanza de brazos iguales o dispositivo comparable no sea sensible a ningún peso positivo menor que un conjunto estándar mínimo. El Axioma 8 es obviamente la generalización de la medición aproximada del axioma cualitativo habitual de adición ejemplificado en el Axioma 2 de la Definición 1. Axioma 9 garantiza que dados los conjuntos desarticulados W_1 y W_2 para ser pesados, conjuntos estándar desarticulados que son menos límites superiores, S_1 para W_1 y S_2 para W_2, se pueden encontrar que también están desarticulados. Esto no se deriva de otros axiomas, porque si $W_1 \cup W_2 = W$, la unión de los límites inferiores a la parte superior desarticulados, $S_1 \cup S_2$ puede ser un conjunto de estándares atómicos más grande que un límite superior mínimo de W sí mismo, por lo que S debe ampliarse para cubrir este caso. Las posibilidades se hacen explícitas en El Teorema 12. El Axioma 10 es una prueba para que W_1 sea estrictamente más pesado que W_2, y la prueba es, por supuesto, en relación con la tosquedad de los conjuntos estándar. El Axioma 11 garantiza que cualquier objeto, o conjunto de objetos que se va a pesar, se encuentre dentro del rango de los conjuntos estándar al tener un par mínimo de conjuntos estándar, es decir, un límite inferior mínimo discreto y un límite inferior más alto discreto entre los conjuntos estándar.

Una muestra de teoremas elementales, se indican en primer lugar, con un enfoque en la transitividad de las relaciones $\curlyvee$ y $\approx$ entre los conjuntos de objetos que se deben pesar.

TEOREMA 10. Si $W_1 \curlyvee W_2$ y $W_2 \curlyvee W_3$ entonces $W_1 \curlyvee W_3$. El siguiente teorema muestra que la relación de equivalencia para conjuntos estándar tiene la propiedad de congruencia para $\curlyvee$ en el set $S \times W$.

TEOREMA 11. Si $S_1 \approx S_2$ y $S_1 \curlyvee W_1$ entonces $S_2 \curlyvee W_1$. El siguiente teorema afirma el criterio comprobable para W_1 y W_2 ser indistinguible.

TEOREMA 12. $W_1 \approx W_2$ si y sólo si W_1 y W_2 tienen pares mínimos equivalentes. Por métodos similares, podemos probar un resultado estrechamente relacionado.

TEOREMA 13. Deje (S_1, S_2) ser un par mínimo para W_1 y (S_3, S_4) ser un par para W_2 entonces $W_1 \curlyvee W_2$ si $S_1 \curlyvee S_3$. Ahora estamos en condiciones de afirmar la transitividad de la distinción de pesos.

TEOREMA 14. Si $W_1 \approx W_2$ y $W_2 \approx W_3$ entonces $W_1 \approx W_3$. La importancia del próximo teorema para determinar la aproximación que se mantiene bajo la adición de dos conjuntos desarticulados W_1 y W_2 de los objetos a sopesar se saca a la sesión en la discusión después del teorema siguiente.

TEOREMA 15. Si $W_1 \cap W_2 = \emptyset$, entonces existen conjuntos estándar S_1, S_1, S_2 y S_2 tal que $S_1 \cap S_2 = S_1 \cap S_2 = S_1 \cap S_2 = S_1 \cap S_2 = \emptyset$, y

(i) (S_1,S_1) es un par mínimo para W_1,

(ii) (S_2, S_2) es un par mínimo para W_2,

(iii) $(S_1 \cup S_2, S_1 \cup S_2)$ y $(S_1 \cup S_2, S_1 \cup S_2)$ son pares mínimos equivalentes para $W_1 \cup W_2$, ó $(S_1 \cup S_2, S_1 \cup S_2)$ y $(S_1 \cup S_2, S_1 \cup S_2)$ son pares mínimos equivalentes para $W_1 \cup W_2$.

Al añadir el peso aproximado de dos colecciones de objetos físicos, de pesarlos individualmente, el resultado aproximado no nos permite inferir cuál de las dos desarticulaciones formuladas en el Teorema 15 se mantiene. Estas dos desjuntas describen dos intervalos mínimos adyacentes pero diferentes. Pero hay una característica importante a tener en cuenta. La adición no aumenta el intervalo de aproximación después de la adición. Por lo tanto, en Teorema 15, cuando se nos da W_1 y W_2, sin más información, no sabemos en qué intervalo mínimo $W_1 \cup W_2$ se encuentra, pero, como la conclusión disyuntiva del axioma afirma, es sólo uno de los dos intervalos mínimos adyacentes, y al hacer la comparación empíricamente, podemos determinar cuál.

La cláusula disyuntiva iii) del Teorema 15 y la asunción de exactitud, es decir, ninguna aproximación, en la medición de la propia secuencia estándar, marcan una diferencia con respecto a los debates y resultados sobre la aproximación en varios lugares diferentes en Medición [Krantz et al., 1971, Vol.I, Secciones 2.2.2, 3.10.3, 4.4.4 y 5.4.3; Suppes et al., 1989, Vol. II, Sección 16.6.2; Luce et al., 1990, Vol. III, Secciones 19.5.4 y 21.8.2]. De hecho, el concepto estándar de un par $(\mu*, \mu*)$ de medidas superior e inferior, es útil como medidas de aproximación, no se introduce en ninguna parte de los tres volúmenes de Fundamentos de medición. La definición de este par $(\mu*, \mu*)$ sigue en la forma que se dio anteriormente para una medida μ.

DEFINICION 12. Deje Ω ser un conjunto no vacío y Ƒ una familia no vacía de subconjuntos de Ω cerrado bajo intersección y unión, y dejar que $(\mu*, \mu*)$ ser un par de funciones de valor real definidas en Ƒ. Entonces la estructura $(\Omega$, Ƒ, $(\mu*, \mu *))$ es una estructura de medida superior-inferior si y sólo si se cumplen los siguientes axiomas para cada A y B en Ƒ:

1. $\mu*(\emptyset)=\mu*(\emptyset) = 0$;

2. $\mu*(A) \geq \mu*(A) \geq 0$;

3. Si $A \supseteq B$ entonces $\mu*(A) \geq \mu* (B)$ y $\mu*(A) \geq \mu*(B)$;

4. Si $A \cap B = \emptyset$, entonces $\mu*(A)+\mu* (B) \leq \mu*(A\cup B) \leq \mu*(A\cup B) \leq \mu*(A)+\mu*(B)$.

El concepto de un par $(\mu*, \mu*)$ medidas superiores e inferiores no es nueva. Se remonta al menos al uso de medidas internas y externas en el análisis en la última parte del siglo XIX por Carathedory [1917/1948] y otros. El uso en probabilidad se remonta al menos a Koopman [1940a; 1940b].

La representación de la medición aproximada se da explícitamente en términos de medidas superiores e inferiores. El teorema 15, o algo más o menos equivalente, es necesario para establecer las propiedades aditivas de las medidas superior e inferior. Estas propiedades se formulan explícitamente en la parte (v) del siguiente teorema.

TEOREMA 16. (Teorema de representación) Deje Ω = (Ω, Ƒ, S, W,) ser una estructura extensa aproximada con una secuencia estándar finita. Luego hay una medida μ sobre Ƒ|S satisfecho el Teorema 1, y un par de medidas superior e inferior (μ∗, μ∗) sobre Ƒ|S ∪W de tal forma que para cualquier S_1 y S_2 en Ƒ|S y W_1 y W_2 en W:

(i) $\mu*(S_1)=\mu(S_1)=\mu*(S_1)$;

(ii) Si (S_1,S_1) es un par mínimo para W_1, entonces $\mu(S_1)=\mu*(W_1) >\mu *(W_1)= \mu(S_1)$;

(iii) $\mu*(W_1) > 0$;

(iv) Si $W_1 \supseteq W_2$, entonces $\mu*(W_1)\geq \mu*(W_2)$ y $\mu*(W_1)\geq \mu*(W_2)$;

(v) Si $W_1 \cap W_2 = \emptyset$ entonces $\mu*(W_1)+\mu*(W_2) \leq \mu*(W_1 \cup W_2) \leq \mu*(W_1 \cup W_2) \leq \mu*(W_1)+\mu*(W_2)$.

Comparación de las desigualdades de cláusula (v) del teorema acaba de demostrarse con las dos posibilidades cualitativas disyuntivas expresadas en El Teorema 15 sugieren que se puede probar un límite más estrecho, y este es el caso. Las desigualdades en la cláusula (v) se puede apretar para (v’) por la inserción del término $\mu*(W_1)+\mu*(W_2)$ que está justificado por el Teorema 15.

COROLARIO 1.

(v) $\mu*(W_1)+\mu*(W_2) \leq \mu*(W_1 \cup W_2) \leq \mu*(W_1)+\mu*(W_2) \leq \mu*(W_1 \cup W_2) \leq \mu*(W_1)+\mu*(W_2)$.

No he declarado una invariancia resultado para el Teorema 16, ya que el obvio sigue de esta parte del Teorema 1. Pero hay una consideración relacionada diferente de mayor interés. El intervalo mínimo de la secuencia estándar finita S = (S,Ƒ,¥) que forma parte de cualquier estructura de medición extensa aproximada, caracterizada por la Definición 11, fija la precisión empírica cualitativa de las mediciones empíricas. Ahora considere una segunda secuencia estándar finita Ƭ para medir la misma propiedad de los subconjuntos de W, y deje $(T_1, T_1’)$ sea el intervalo mínimo de Ƭ. Entonces, a diferencia de la aceptación convencional de una unidad de medición extensa, en el caso de la medición aproximada, tenemos una comparación directamente cualitativa de la precisión dada por la relación empírica de $(S_1, S_1’)$ a $(T_1, T_1’)$. Por ejemplo, la "escala" que uso regularmente para pesarme tiene un intervalo mínimo de 0,25 libras, pero otra inútil a menudo tiene un intervalo mínimo de 0,1 kg. Puesto que 1 kg a 2,20 lb, la relación de 0,25 lb a 0,1 kg es.25/.22, que es, a dos decimales, 1,14. Por lo tanto, la secuencia estándar calibrada en el sistema métrico es ligeramente más precisa, aunque ambas "escalas" proporcionan intervalos mínimos más allá de la precisión normalmente observada o registrada para la mayoría de los propósitos. Cualquier refinamiento adicional de cualquiera de los dos es de poco o ningún interés con el propósito de medir el peso corporal.

Aunque ambas "escalas" proporcionan intervalos mínimos más allá de la precisión normalmente observada o registrada para la mayoría de los propósitos. Cualquier refinamiento adicional de cualquiera de los dos, es de poco o ningún interés con el propósito de medir el peso corporal.

Ejemplos similares se dan fácilmente para la medición de la longitud utilizando diferentes secuencias estándar finitas. Además, la teoría aproximada desarrollada aquí en términos de medidas superiores e inferiores puede ampliarse fácilmente mediante los mismos métodos de medición de diferencias, medición de bisección y medición conjunta, y con algo más difícil a varias dimensiones, por ejemplo. , geometría afín o euclidiana. No es de extrañar que las aplicaciones de las medidas superior e inferior se hayan aplicado más para aproximar la medición de la probabilidad subjetiva. Una revisión y análisis exhaustivos es dado por Walley [1991]. Suppes [1974], utiliza probabilidades superiores e inferiores, pero sin distinción transitiva.

El enfoque aquí ha sido en la medición aproximada, pero una teoría muy diferente de probabilidades superiores e inferiores se puede derivar de una generalización teórica de conjunto directo de variables aleatorias como funciones aleatorias a relaciones aleatorias. Una indicación de la diferencia teórica es que las medidas superior e inferior derivadas de las relaciones aleatorias por Suppes y Zanotti [1977] son capacidades de orden infinito en el sentido de Choquet [1953]. Por el contrario, las medidas superior e inferior que se consideran aquí para la medición aproximada son la nota sobre las capacidades de orden dos. Claramente, el sentido de aproximación introducido aquí y en Suppes [1974] no es en ningún sentido la única posibilidad.

4.- DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD CUALITATIVA DE ERROR

En la teoría estándar de la medición extensa fundamental, se formulan axiomas cualitativos que conducen a una asignación numérica única hasta una transformación de similitud positiva. La idea central de la teoría de las cantidades aleatorias es reemplazar la asignación numérica por una asignación variable aleatoria. Esto significa que a cada objeto se le asigna una variable aleatoria. En el caso de cantidades extensas, la expectativa de la variable aleatoria sustituye a la asignación numérica habitual, y la distribución de la variable aleatoria refleja la variabilidad de la propiedad en cuestión, que podría ser intrínseca al objeto o ambiente, o debido a errores instrumentales de observación. En cualquier caso, la existencia y el uso de distribuciones con varianzas positivas son casi universales en la práctica real de la medición en la mayoría de los ámbitos de la ciencia.

Es una queja generalizada sobre la literatura estándar de fundamentos de medición que se ha escrito muy poco, que combina el análisis estructural cualitativo de los procedimientos de medición y el análisis de la variabilidad o error. En vista del extraordinariamente grande número de artículos que se han escrito sobre los fundamentos de la teoría del error, que se remontan al siglo XVIII con el trabajo fundamental ya por Simpson, Lagrange y Laplace, seguido de las importantes contribuciones de Gauss, es sorprendente que los dos tipos de análisis no se han combinado a menudo. Parte de la razón es el hecho de que, en toda esta larga historia, la literatura sobre la teoría de los errores ha sido de carácter intrínsecamente cuantitativo. Los resultados distributivos específicos han sido generalmente el objetivo del análisis, y los supuestos que conducen a tales resultados se han formulado en términos probabilísticos cuantitativos. Este marco cuantitativo también es asumido en la importante serie de documentos de Falmagne y sus colaboradores sobre representaciones variables aleatorias para mediciones a intervalos, conjuntas y extensas (véanse Falmagne [1976; 1978; 1979; 1980; 1985]; Falmagne e Iverson [1979]; Iverson y Falmagne [1985]).

El trabajo aquí comunicado, combina en un análisis las estructuras cualitativas características de los fundamentos de la medición y las estructuras probabilísticas características de la teoría del error o la teoría de la variabilidad. Los detalles se dan en Suppes y Zanotti [1992], y Suppes et al. [1989, Ch. 16].

El enfoque de la distribución de las variables aleatorias representativas de un objeto consiste en desarrollar, en el estilo habitual de la teoría de la medición, axiomas cualitativos sobre los momentos de la distribución, que se representan como expectativas de poderes de la variable aleatoria numérica representativa. La primera pregunta natural es si puede haber o no un procedimiento cualitativo bien definido para medir los momentos. Esto se discute en la Sección 4.1, Sección 4.2 presenta los conceptos primitivos cualitativos y la Sección 4.3 el sistema de axiomas y el teorema de representación.

4.1.- Variabilidad medida por momentos

Antes de dar los desarrollos formales, abordamos la medición de los momentos desde un punto de vista cualitativo. Aquí delineamos un enfoque sin ninguna afirmación de que es la única manera de concebir el problema. De hecho, creemos que el pluralismo de enfoques para medir la probabilidad es enganchada por los momentos de medición, por razones que son obvias dada la estrecha conexión entre los dos.

El único enfoque que delineamos aquí corresponde a la limitación de la caracterización de la probabilidad de frecuencia relativa, que formulamos aquí de manera algo informal. Seamos una secuencia infinita de ensayos independientes con el resultado en cada ensayo siendo cabezas o colas. Que H(i) sea el número de cabezas en las primeras i pruebas de s, con la disposición de que el límite existe y que la secuencia s satisface ciertas condiciones de aleatoriedad que no es necesario analizar aquí.

$$P(\text{heads}) = \lim_{i \to \infty} H(i)/i,$$

En la práctica, por supuesto, sólo un segmento inicial finito de dicha secuencia se realiza como una muestra estadística. Sin embargo, normalmente en el caso de probabilidad, el procedimiento empírico abarca varios pasos. En el enfoque que se da aquí, el primer paso es utilizar la caracterización de frecuencia relativa limitante. El segundo paso es producir y analizar una muestra finita con métodos estadísticos adecuados.

Nuestro enfoque para la medición empírica de momentos cualitativos abarca el primer paso, pero no el segundo de dar métodos estadísticos detallados. Por lo tanto, que a_0 sea un objeto de pequeña masa de la que tenemos muchas réplicas precisas, por lo que estamos asumiendo aquí que la variabilidad en a_0 y sus réplicas, a^j_0, j = 1 , 2,... son insignificantes. Luego usamos réplicas de a_0 para sopesar cualitativamente un objeto a. En cada ensayo, forzamos la equivalencia, como es costumbre en la física clásica. Por lo tanto, en cada prueba i, tenemos

$$a \sim \left\{a_0^{(1)}, a_0^{(2)}, \ldots, a_0^{(m_i)}\right\}.$$

El conjunto que se muestra a la derecha simbolizamos como $m_i a_0$. Entonces, como en el caso de la probabilidad, caracterizamos un a^n, el enésimo momento sin formato cualitativo de un a, por

$$a^n \sim \lim_{j\to\infty} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^{j} m_i^n a_0,$$

pero, en la práctica, utilizamos un número finito de ensayos y usamos la estimación ˆ $\hat{a}^n$:

$$\hat{a}^n \sim \frac{1}{j} \sum_{i=1}^{j} m_i^n a_0,$$

y por lo tanto también sólo estimar un número finito de momentos. No es aquí el punto de detallar los procedimientos estadísticos para estimar uno. Nuestro objetivo sólo es esbozar cómo se puede abordar la determinación empírica de los momentos sin procesar cualitativos.

Hay una observación importante con la que lidiar. Los datos observados, resumidos en los enteros m_1, m_2,...,m_j, en los que se basa el cálculo de los momentos, también constituyen un histograma de la distribución. ¿Por qué no estimar la distribución directamente? Cuando se postula una distribución de una forma en particular, no es necesario que haya conflicto en los dos métodos, y el histograma puede ser de utilidad adicional en la prueba de bondad de ajuste.

La razón para trabajar con los momentos crudos es teórica más que empírica o estadística. Varias distribuciones se pueden caracterizar cualitativamente en términos de sus momentos crudos de una manera relativamente sencilla, como muestran los ejemplos a considerar. Además, las condiciones cualitativas generales sobre los momentos, se dan en el Teorema de Representación. Sin duda existen enfoques cualitativos alternativos para caracterizar distribuciones y, a medida que se desarrollan, es muy posible que se superen a la utilizada aquí.

Ahora nos dirigimos a los desarrollos formales. Al probar el teorema de representación de cantidades extensas aleatorias aplicamos un teorema bien conocido de Hausdorff [1923] sobre el problema del momento unidimensional para un intervalo finito.

TEOREMA DE HAUSDORFF. Deje μ_0, μ_1, μ_2,... ser una secuencia de números reales. Entonces una condición necesaria y suficiente para que exista una distribución de probabilidad única F en [0, 1] tal que μ_n es el enésimo momento crudo de la distribución F, es decir,

$$\mu_n = \int_0^1 t^n dF, \qquad n = 0, 1, 2, \ldots, \tag{6}$$

es que μ_0 =1 y todas las desigualdades siguientes se mantienen:

$$\mu_\nu - \binom{k}{1}\mu_{\nu+1} + \binom{k}{2}\mu_{\nu+2} + \cdots + (-1)^k\mu_{\nu+k} \geqslant 0 \; for \; k, \nu = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots\ . \tag{7}$$

Una terminología estándar es que una secuencia de números μ_n, n= 0, 1, 2, ... es completamente monotónico si se satisfacen las desigualdades (2), en notación binomial más compacta μ_ν $(1-\mu)^k$ 0, para k, ν =0 , 2, ...(para un análisis detallado de muchos resultados relacionados sobre el problema de los momentos, ver Shohat and Tamarkin [1943]).

Es importante señalar que no necesitamos una especificación adicional separada del dominio de definición de la distribución de probabilidad en el teorema de Hausdorff. Las condiciones necesarias y suficientes expresadas en las Desigualdades (2) garantizan que todos los momentos se encuentran en el intervalo [0, 1], por lo que se puede tomar como el dominio de la distribución de probabilidad sin más suposición.

4.2.- Primitivas cualitativas para momentos

La idea, entonces, es proporcionar una axiomatización cualitativa de los momentos para los que se obtiene un análogo cualitativo de Desigualdades (2) y luego mostrar que los momentos cualitativos tienen una representación numérica que permite invocar el teorema de Hausdorff. Por lo tanto, la estructura cualitativa comienza primero con un conjunto G de objetos. Estos son los objetos físicos o entidades a los que esperamos asociar variables aleatorias en última instancia. Más precisamente, esperamos representar el atributo extenso seleccionado de cada objeto por una variable aleatoria. Sin embargo, para llegar a las variables aleatorias, debemos generar a partir de G un conjunto de entidades que podamos considerar como correspondientes a los momentos crudos y mixtos de los objetos en G. Para ello, debemos suponer que hay una operación de combinación para que podamos generar elementos un $a^n = a^{n-1}.a$, que desde un punto de vista cualitativo, se considerará que corresponde a los momentos crudos de a. Es apropiado pensar en esta operación como una operación de multiplicación, pero corresponde a la multiplicación de variables aleatorias, no a la multiplicación de números reales. Asumiremos como axiomas que la operación es asociativa y conmutativa, pero que no se debe suponer que es distributiva con respecto a la unión desarticulada (que corresponde a la adición numérica) se puede ver en un ejemplo de contador variable aleatorio, dado en Gruzewska [1954].

Pasamos ahora a la definición explícita de un semigrupo que contiene los axiomas asociativos y conmutativos de la multiplicación.

DEFINICIÓN 13. Deje que A sea un conjunto no vacío, G un conjunto no vacío, una operación binaria en A y 1 un elemento de G. A continuación, Ꝗ = (A, G, .·, 1) es un semigrupo conmutativo con identidad 1 generado por G si se satisfacen los siguientes axiomas para cada a, b y c en G y s y t en A:

1. Si a ∈ G, entonces a ∈ A.

2. Si s, t ∈ A, entonces (s·t) ∈ A.

3. Cualquier miembro de A puede ser generado por un número finito de aplicaciones de Axiomas 1−2 de los elementos de G.(A es el conjunto de cadenas finitas con alfabeto G.)

4. a·(b·c)=(a·b)·c.

5. a·b = b·a.

6. 1·a = a.

Tenga en cuenta que, debido a la asociatividad del axioma, omitimos paréntesis de aquí en adelante. Tenga en cuenta, además, que, sobre la base de Axioma 3 pensamos en los elementos de A como cadenas finitas de elementos de G. Intuitivamente los elementos de A son momentos mixtos cualitativos. Además, debido a que el funcionamiento del producto es asociativo y conmutativo, siempre podemos escribir los momentos mixtos en una forma estándar que implica las potencias de los generadores. Por ejemplo, a • a • a • c • a • b • c =a^4 • b • c^2. Esta expresión se interpreta como el momento mixto cualitativo que consiste en el cuarto momento crudo de un tiempo el primero de b veces el segundo de c. Denotamos este semigrupo por A.

Nuestro último primitivo es un orden cualitativo de momentos. Como siempre, lo denotaremos por. La primera cuestión se refiere al ámbito de esta relación. A efectos de medición extensa, es útil suponer que el dominio es todos subconjuntos finitos de los elementos del semigrupo A. Podemos afirmar esto como una definición formal:

DEFINICION 14. Deje que A sea un conjunto no vacío y ¥ una relación binaria en F, la familia de todos los subconjuntos finitos de A. Entonces Un Ц = (Ц, Ƒ,¥) es una estructura extensa débil si se cumplen los siguientes axiomas para cada B, C y D en Ƒ:

1. La relación ¥ es un orden débil de Ƒ.

2. Si B∩D = C ∩D = ∅́, entonces B ¥ C si BUD ¥ C U D.

3. Si B = ∅́, entonces B ϒ ∅́

Superficialmente la estructura recién definida parece una estructura familiar de probabilidad cualitativa, pero de hecho no lo es. La razón es que debido a que A es un conjunto infinito, no podemos asumir que Ƒ está cerrado bajo complementación, porque eso violaría la suposición de que los subconjuntos en Ƒ son finitos.

Un punto conceptual importante es que requerimos el orden en magnitud de diferentes momentos crudos. Una interpretación empírica estándar de lo que significa decir que el segundo momento crudo, a^2, es menor que el primero, a^1, fue descrito anteriormente. Un punto formal, apropiado para hacer en esta etapa, es contrastar el resultado de singularidad que anticipamos para el teorema de representación con la singularidad habitual hasta una similitud (es decir, multiplicación por una constante positiva) para la medición extensa. Tenemos, en la configuración actual, no sólo la operación extensa, sino también la multiplicación semigrupo para la formación de momentos; por lo tanto, el resultado de la unicidad es absoluto (es decir, la unicidad en el sentido de la función de identidad).

Dada esta estricta singularidad, la comparación de magnitudes de a^m y a^n para cualquier número natural m y n no es un problema teórico. Por supuesto, es evidente que cualquier procedimiento de medición de momentos, fundamental es fundamental o derivado, deberá satisfacer requisitos de unicidad tan estrictos para aplicar los teoremas de Hausdorff u otros teoremas relacionados en la teoría de los momentos.

Dentro de Ƒ, podemos definir lo que significa tener n copias desarticuladas de B ∈ Ƒ:

$$1B = B$$
$$(n+1)B \sim nB \cup B',$$

Donde $nB \cap B' = \theta$, y $B' \sim B$ and $\sim$es la relación de equivalencia definida en términos del orden básico ‶Ƴ en Ƒ. El Axioma 3, de la Definición 15, que sigue, será simplemente la suposición de que tal B' siempre existe, por lo que nB se define para cada n. Es esencial señalar que esta definición cursiva extensa o aditiva estándar es bastante distinta de la de los momentos a^n dados anteriormente.

Sistema de Axioma para momentos cualitativos

El objetivo es proporcionar axiomas en los momentos sin procesar cualitativos de tal forma que podamos probar que el objeto a, puede ser representado por una variable aleatoria X_a, y el enésimo momento crudo a^n está representado por la enésima potencia de X_a (i.e., por $X^n{}_a$).

Para mayor comodidad, asumiremos que las estructuras con las que estamos tratando están limitadas en dos sentidos. En primer lugar, el conjunto G de objetos tendrá un elemento más grande 1, lo que intuitivamente significa que la expectativa de las variables aleatorias asociadas con los elementos de a no superará la de 1. Además, normalizaremos las cosas para que la expectativa asociada con X_1 sea 1. Esta normalización aparece en la axiomatización como 1 actuando como el elemento de identidad del semigrupo. En segundo lugar, debido a la condición que surge del teorema de Hausdorff, esta elección significa que todos los momentos crudos están disminuyendo en potencias de n (es decir, si m ≤ n, entonces a^n‶Ƴ a^m). Obviamente la teoría se puede desarrollar para que las masas sean mayores que 1, y los momentos se hacen más grandes con el aumento de n. Esta es la teoría natural cuando la distribución de probabilidad se define en la línea real positiva. Aquí, la notación exponencial para los momentos cualitativos a^n es intuitivamente clara, pero es deseable tener la siguiente definición recursiva formal:

$a^0 = 1$

$a^n = a^{n-1}.a$

para tener una interpretación clara de a_0.

Antes de dar el sistema de axioma, debemos discutir más plenamente la cuestión de lo que constituirá un análogo cualitativo de la condición de desigualdad de Hausdorff, (2).

Sólo tenemos una operación correspondiente a la suma y no a la resta en el sistema cualitativo; por lo tanto, para k, un número par, reescribimos esta desigualdad únicamente en términos de adición de la siguiente manera:

$$\mu_\nu + \binom{k}{2}\mu_{\nu+2} + \cdots + \mu_{\nu+k} \geqslant \binom{k}{1}\mu_{\nu+1} + \cdots + k\mu_{\nu+(k-1)}, \tag{8}$$

y una desigualdad correspondiente para el caso en el que k es impar. En el sistema cualitativo, el análogo a la desigualdad (3) debe escribirse en términos de unión de conjuntos de la siguiente manera para k incluso:

$$a_\nu \cup \binom{k}{2}a^{\nu+2} \cup \cdots \cup a^{\nu+k} \succsim \binom{k}{1}a^{\nu+1} \cup \cdots \cup ka^{\nu+(k-1)}. \tag{9}$$

Cuando k es par,

$$a_\nu \cup \binom{k}{2}a^{\nu+2} \cup \cdots \cup ka^{\nu+(k-1)} \succsim \binom{k}{1}a^{\nu+1} \cup \cdots \cup a^{\nu+k}. \tag{10}$$

Hay varias observaciones que hacer sobre este par de desigualdades. En primer lugar, podemos inferir que, para $a \prec 1$, en lugar de $a \sim 1$, los momentos son una secuencia estrictamente decreciente (i.e., a^v ϒ a^{v+1}). En segundo lugar, el significado de tales términos como $\binom{k}{2}av + 2$ se definió recursivamente antes, con la recursividad justificada por el Axioma 3 a continuación. Es fácil entonces ver que los elementos indicados en Desigualdades (2) y (5) son de conjuntos desarticulados. Sobre la base de la terminología anterior, podemos introducir la siguiente definición. Una secuencia cualitativa a^0, a^1, a^2, a^3, ... es cualitativamente, completamente monotónico si se satisfacen las desigualdades (4) y (5).

DEFINICION 15. Una estructura Ц =(A, Ƒ, G,¥ , ·, 1) es una estructura extensa aleatoria con objetos independientes — los elementos de G — si se cumplen los siguientes axiomas para a en G, s y t en a, k, m, m', n y n' números naturales, y B y C en Ƒ :

1. La estructura (A, Ƒ, ¥) es una estructura extensa débil.
2. La estructura (A, G, ·, 1) es un semigrupo conmutativo con identidad 1 generada por G.
3. Hay una C' en Ƒ tal que C' ∼ C y C' ∩B = Ǿ.
4. Arquímedeo. Si B ϒ C, entonces para cualquier D en Ƒ hay un n tal que nB ¥ nC ∪ D.

5. Independencia. Deje que los momentos mixtos s y t no tengan objetos comunes:

a. Si m1 ¥ ns y m’1 ¥ n’t, entonces mm’1 ¥ nn’(s·t).

b. Si m1 ¥ ns y m’1 ¥ n’t, entonces mm’1 ¥ nn’(s·t).

6. La secuencia a^0, a^1, a^2, ... de momentos sin formato cualitativos es cualitativamente, completamente monotónico.

El contenido del Axioma 1 es familiar. Lo que es nuevo aquí es, en primer lugar, Axioma 2, en el que el semigrupo conmutativo, como se mencionó anteriormente, se utiliza para representar los momentos mixtos de una colección de objetos. El axioma 3 es necesario para que la definición recursiva de (n+1) B esté bien definida como se indica anteriormente. La forma especial del axioma arquímedeo es la necesaria cuando no hay axioma de sin resolvabilidad, como se discute en la Sección 3.2.1 de Krantz et al. [1971]. La forma dual de Axioma 5 es justo lo que se necesita para demostrar la independencia de los momentos de diferentes objetos, lo que significa que los momentos mixtos factor en términos de expectativa. Tenga en cuenta que es simétrico en y . La notación utilizada en el Axioma 5 implica tanto uniones desarticuladas, como en m1, como la notación del producto f o momentos mixtos, como en (s·t). El Axioma 6 formula el análogo cualitativo de la condición necesaria y suficiente de Hausdorff como se mencionó anteriormente.

TEOREMA 17. (Teorema de representación) Deje que Ц = (A, Ƒ, G,¥ , •, 1) sea una estructura extensa aleatoria con objetos independientes. Luego existe una familia de variables aleatorias de valor real, de tal forma que:

(i) cada objeto a en G está representado por una variable aleatoria X_a cuya distribución se encuentra entre [0, 1] y está determinado de manera única por sus momentos;

(ii) las variables aleatorias $\{X_a, a\in G\}$ son independientes;

(iii) para cada a y b en G con probabilidad uno

$X_{a \cdot b} = X_a \,.\cdot X_b$;

(iv) E(XB) ≥ E(XC), si B ¥ C;

(v) Si B∩C = Ø entonces $X_{B \cup C}$ = XB +XC;

(vi) Si B ≠ 0, entonces E(XB) > 0;

(vii) $E(X^n{}_1)$=1 por cada n.

Por otra parte, cualquier función ϕ de Re a Re de tal manera que $\{\phi(X_B), B\in Ƒ\}$, Satisface (i)–(vii) es la función de identidad.

Si nos especializamos en los axiomas de la Definición 15 a afirmaciones cualitativas sobre distribuciones de un formulario en particular, podemos reemplazar al Axioma 6 en la monotonía completa de la secuencia de momentos cualitativos de un objeto por condiciones mucho más simples. De hecho, no conocemos una forma cualitativa más sencilla de caracterizar distribuciones de una forma dada que por tales axiomas cualitativos en los momentos. El corolario siguiente se refiere a tal caracterización del uniforme, Bernoulli, y las distribuciones beta en [0, 1], donde la distribución beta está restringida a parámetros con valores enteros α y β.

COROLARIO 2. (Corolario del Teorema de Representación) Deje que Ц =(A, Ƒ, G, ¥ , .·., 1) sea una estructura que satisfaga a los Axiomas 1–5 de la definición 15, y, para cualquier a en G, asuma un a ¥ 1.

I. Si los momentos de un objeto a para n ≥ 1 satisfacen

$(n+1)a^n \sim 2a$,

entonces X_a se distribuye uniformemente en [0, 1].

II. Si los momentos de un objeto a para n ≥ 1 satisfacen

$a^n \sim a$,

entonces X_a tiene una distribución de Bernoulli en [0, 1].

III. Si los momentos de un objeto a para n ≥ 1 satisfacen

$(\alpha + \beta + n)a^{n+1} \sim (a + n)a^n$,

Donde α y β son enteros positivos, entonces X_a tiene una distribución beta en [0, 1].

Tenga en cuenta que una distribución de Bernoulli en X_a implica que todo el peso de probabilidad se adjunta a los puntos finales del intervalo, de modo que, si p es el parámetro de la distribución, como en notación estándar, entonces

$E(X_a) = (1-p)\cdot 0+p\cdot 1=p$.

Observamos informalmente que algunas otras distribuciones estándar con diferentes dominios también pueden caracterizarse cualitativamente en términos de momentos. Por ejemplo, la distribución normal en (−∞, ∞) con la media igual a cero y la varianza igual a uno se caracteriza de la siguiente manera:

$$
\begin{aligned}
&a^0 \sim 1,\\
&a^1 \sim \varnothing,\\
&a^2 \sim 1,\\
&a^{2(n+1)} \sim (2n+1)a^{2n} \quad \text{for } n \geqslant 1.
\end{aligned}
$$

5.- MARCAS CONCLUSIVAS

Hay varios temas que no se tratan adecuadamente en las páginas anteriores que me gustaría mencionar brevemente.

Generalizaciones geométricas. Los métodos de medición extensos aproximados de la Sección 3, de hecho, incluso los modelos de medición finitos igualmente espaciados de la Sección 2, tienen generalizaciones geométricas naturales. Y no sólo demasiada geometría euclidiana. Los modelos de espaciado igual se pueden dar fácilmente para la geometría esférica, o el ejemplo bastante diferente de geometría afín. Las aproximaciones de la medición extensa por medición superior e inferior pueden encajar en bien como en un marco para mediciones espaciales en geometría y física. Los detalles son algo más complicados, pero el punto de vista conceptual se generaliza fácilmente en geometrías n-dimensionales de varios tipos, especialmente las utilizadas en el análisis de datos científicos e ingeniería.

Más información sobre la aproximación. La sección 3 se refería principalmente a un tipo particular de aproximación, pero el tema es mucho más amplio de lo que podría desarrollarse en detalle aquí. Tal vez la mayoría de los que faltan es cualquier intento de examinar la literatura grande y compleja en estadísticas sobre errores de medición de todo tipo. Las cuestiones de importancia van desde la introducción estándar en modelos de regresión lineal de errores distribuidos normalmente con media cero hasta la estimación de errores de predicción en modelos no lineales. En gran parte de este trabajo, el marco es cuantitativo y la teoría de medir los errores en sí no se desarrolla, pero se asume sin comentarios.

Por supuesto, los límites de la medición precisa están estresados, especialmente en la mecánica cuántica. El ideal del siglo XIX de aproximaciones cada vez mejores de la medición de cantidades físicas ha sido sustituido por resultados teóricos como las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, y, más en general, por la comprensión de que la medición implica interacción entre el instrumento y el objeto que se está midiendo. Las perturbaciones de tales interacciones bloquean la carretera a mediciones idealmente exactas de cualquier cantidad continua.

Las secciones 3 y 4 muestran la tensión que surge naturalmente si se da un enfoque de aproximación demasiado unificado. Los resultados de la Sección 3 son en términos de medidas superiores e inferiores. En cambio, la teoría cualitativa bastante elaborada de las distribuciones de error en la Sección 4 se centra enteramente en los resultados indicados en términos de medidas de probabilidad estándar. ¿Cómo se reconciliarán estos dos enfoques? Hay varias maneras de responder. En primer lugar, las medidas superior e inferior de la Sección 3 son, en cierto sentido, pre estadístico. Las medidas superior e inferior introducidas no son estándar en absoluto, por ejemplo, en las introducciones elementales de errores y su medición en los manuales de laboratorio de estudiantes en física, química o la mayoría de las asignaturas de ingeniería. La intención aquí es proporcionar una base conceptual para lo que a menudo no se habla en estos asuntos. Un estudiante ingenuo puede preguntar: "¿Qué significa reportar una medición de peso como 4.7±· 1 gm?" La respuesta puede ser simple, o tan complicada como el análisis axiomático de la Sección 3. Y la Sección 3 ofrece sólo una parte de la respuesta complicada. Los informes de los fabricantes sobre la exactitud de los instrumentos que venden, el estudio de los psicólogos de los errores humanos, y siempre los efectos perturbadores de las interacciones con el medio ambiente que puede notar incluso ser etiquetado como errores, todas estas y otras fuentes también, añadir a la complejidad de la imagen total.

La Sección 4 proporciona una toma diferente de los errores. Aborda el problema de proporcionar una base, basada en axiomas cualitativos, de diversas distribuciones de probabilidad ampliamente utilizadas en el análisis estadístico de datos. Esta es una manera, importante para el desarrollo sistemático de la teoría de la medición, de dar un axiomático bajo la fijación para estas distribuciones familiares, y ver cómo surgen naturalmente de los principios cualitativos.

CAPITULO IX

EXPLICACIÓN TECNOLÓGICA

Por Joseph C. Pitt

1 INTRODUCCION

El propósito de este capítulo es proporcionar un relato de la explicación tecnológica. El tema es relativamente inexplorado. Por lo tanto, en muchos aspectos se trata tanto de un intento de establecer el territorio que debe ser cubierto como una teoría totalmente adecuada de la explicación tecnológica.

La estructura del capítulo es la siguiente: después de una discusión sobre la necesidad de una teoría de la explicación tecnológica, yo diferencio la explicación tecnológica de la explicación física, teleológica, psicológica y social. A continuación, se presta atención a responder preguntas como medio de proporcionar explicaciones tecnológicas. También se introduce una distinción entre audiencias internas y externas para proporcionar un medio para caracterizar diferentes tipos de explicaciones en términos de las audiencias a las que se dirigen y los tipos de preguntas que, cuando se responden, proporcionan la adecuada explicación. A continuación se introduce el concepto de sistema. La idea a desarrollar es que un componente crucial de una explicación tecnológica es colocar al artefacto/mecanismo/actividad/función para ser explicado en una relación con otras partes del sistema en las que está incrustado. La fuerte posición de que no hay explicación sin relacionar la cosa que se debe explicar a otra cosa está dispuesta. Esta idea se elabora mostrando cómo los problemas específicos del artefacto, como el diseño, la función o la estructura de un artefacto, solo se pueden explicar adecuadamente por referencia al sistema en el que tienen un rol. Inevitablemente, hablar de sistemas nos llevará a los sistemas sociales como artefactos tecnológicos y el grado en que una explicación de algún aspecto de un artefacto técnico requiere un atractivo para algún aspecto de un sistema social en el que funciona. Por último, tras un debate sobre algunos ejemplos, se discute la falta de simetría entre las explicaciones de los éxitos tecnológicos y los fracasos tecnológicos y la importancia de esa falta de simetría.

2.-.Relevancia

¿Por qué necesitamos una teoría de la explicación tecnológica? La respuesta estándar a una pregunta similar, "¿Por qué necesitamos una teoría de la explicación científica?" tiene una respuesta bastante directa: "Porque se supone que la ciencia explica el mundo y necesitamos saber cuándo esas explicaciones son buenas". Pero claramente una respuesta similar a la pregunta sobre la explicación tecnológica no servirá. La tarea de justificar la necesidad de una teoría de la explicación tecnológica es que, a diferencia de la explicación científica, que sólo tiene que explicar por qué las cosas en el mundo natural hacen las cosas que hacen, hay un montón de diferentes tipos de preguntas que podemos hacer sobre nuestra tecnología. Eso sugiere que hay muchos tipos de explicaciones tecnológicas o que la cuenta que desarrollamos será única. Si bien eso no responde a la pregunta principal, sugiere una estrategia: primero, identificar de qué se tratan las explicaciones tecnológicas.

No hablaré de tecnología, sino de tecnologías, tecnologías específicas. Están por todas partes. Y ese es el mismo punto. Estamos rodeados, integrados, dependientes de, apoyados por, un fusionado a través de nuestras tecnologías. Hacen posible la forma en que vivimos. También tienen impactos positivos y negativos en nosotros y en la ecología del planeta. Son la expresión de los aspectos creativos, inventivos y tal vez malévolos de nuestro carácter colectivo. En resumen, nuestras tecnologías y cómo las utilizamos son lo que nos marca como humanos. Eso significa que si queremos saber qué somos y cómo llegamos a este punto tenemos que explicar cómo creamos nuestras tecnologías y cómo nos ayudaron y/o nos retuvieron. Esto significa que una teoría de la explicación tecnológica es relevante para todas las formas de actividad humana, ya que todas ellas implican tratar con tecnologías, incluida la ciencia. Lo que una teoría de la explicación tecnológica proporcionará es los medios para explicar cómo un artefacto llegó a ser lo que es. Esto puede ser una historia causal, pero también será parcialmente un atractivo para una variedad de factores sociales. Una teoría de la explicación tecnológica también proporcionará los medios para explicar el papel del artefacto en nuestras vidas y el impacto que la introducción del artefacto tuvo en nuestras estructuras sociales, metas y valores. Por último, también proporcionará los medios para explicar los fallos tecnológicos y distinguir las cuestiones relativas al fallo del sistema de las cuestiones de la evaluación de la culpa y la responsabilidad.

3.- EXPLICACIÓN TECNOLÓGICA VERSUS CIENTÍFICA

Como se ha señalado anteriormente, la clave para elaborar un relato de la explicación tecnológica es responder a la pregunta: ¿qué estamos explicando? A diferencia de la ciencia, donde en el pasado se ha asumido, incorrectamente, que la respuesta es bastante sencilla, como se señaló anteriormente, el enfoque en las explicaciones tecnológicas puede tener múltiples vinculaciones. La opinión tradicional es que el propósito de una explicación científica es ayudarnos a entender por qué el mundo funciona como lo hace en circunstancias específicas. La historia del desarrollo de teorías de la explicación científica revela intentos constantes de encontrar un relato teórico general de lo que hace una buena explicación que se aplica a todas las ciencias. (La literatura sobre la explicación es vasta. Es demasiado grande para discutir aquí. Afortunadamente, hay dos grandes historias narrativas de los debates. El primero es de Wesley Salmon [1989] en su introducción al volumen editado Scientific Explanation. La segunda discusión, más reciente, es de Jeroen de Ridder [2007]). Desde los primeros grandes esfuerzos modernos en esta dirección de Hempel en [1948], ha habido numerosos intentos de tal tipo para construir una teoría general de la explicación. Estos esfuerzos pueden ahora disminuir a medida que el trabajo en las historias y filosofías de las ciencias individuales revela grandes diferencias entre ellos en términos de métodos, que a su vez parecen requerir el desarrollo de teorías individuales de explicación para física, biología, química, geología, etc. Pero incluso si las teorías universales de la explicación científica disminuyen en la utilidad en las ciencias naturales, no está claro que podrían haber sido de utilidad para las ciencias técnicas cuando se consideran aparte de las ciencias naturales, es decir, cuando las tecnologías no se consideran meras ciencias aplicadas y las ciencias técnicas, como las diversas disciplinas de la ingeniería, se consideran por derecho propio. Es la ambición universal de estas teorías filosóficas lo que las hace inaplicables en las ciencias técnicas. Considere, por ejemplo, la cuenta de Hempel.

3.1.- La teoría DN

Conocida como la Teoría Lógica Deductiva-Nomo, la Teoría de la Ley de Hempel (DN) requiere que en las premisas del argumento deductivo que constituye la explicación debe aparecer la expresión de, al menos una ley de la naturaleza. Si aplicamos esta cuenta a las cuestiones tecnológicas que necesitan explicación, esto requeriría que existieran leyes naturales que regulen las tecnologías. Sin embargo, no existen leyes tecnológicas naturales, excepto que puede ser la Ley de Consecuencias No Deseadas. En ausencia de leyes de la naturaleza para las tecnologías, este tipo de teoría no funcionará. Como se ha señalado, un componente significativo de una explicación DN es el requisito de la presencia de una ley. Sin embargo, ni el modelo, ni la teoría de la explicación que lo apoya proporcionan un procedimiento de decisión para seleccionar qué ley elegir. Las leyes, en este contexto, se formulan en el contexto de las teorías. La suposición no articulada de Hempel parece ser que en la ciencia sólo hay una teoría en juego a la vez y por lo tanto no hay necesidad de un procedimiento de decisión. Pero esto supone que incluso cuando sólo hay una teoría en juego que sabemos cuál de sus muchas leyes y generalizaciones emplear en esta explicación. Además, dado que las consideraciones históricas y sociológicas recientes han comenzado a afectar a las rumiaciones filosóficas, ahora sabemos que el trabajo científico rara vez tiene lugar en un entorno tan limpio. En el contexto de hacer ciencia, generalmente hay múltiples cuentas que piden la supremacía y gran parte de la emoción en las ciencias proviene del choque de explicaciones teóricas. En los contextos científicos, como tecnológicos, olvidar que se trata de actividades muy humanas, sujetas a las fortalezas y debilidades de cualquier esfuerzo epistemológico humano, es establecer metas que sean inalcanzables. Hacerlo es ignorar lo que realmente se puede lograr. El modelo DN y las respuestas a él son sólo un tipo de explicación y ellas fueron ideadas con la física como la ciencia modelo para hacer la explicación. Es una manera de explicar por qué las cosas naturales en el mundo hacen las cosas que hacen por apelar a la estructura de la naturaleza. Y esa es una de las razones por las que parece inapropiado para asuntos tecnológicos. Las explicaciones tecnológicas son únicas en la medida en que se refieren a cuestiones tecnológicas, cuestiones que surgen debido a las cosas que los seres humanos han construido. Algunos de estos elementos requieren conocimiento de cómo funciona la naturaleza para ser construidos, por ejemplo, óptica para telescopios, química para drogas. Pero la solicitud de una explicación tecnológica no será satisfecha exhaustivamente por un llamamiento a la física o química de la materia. ¿Por qué es esto? Una respuesta, que se debe desarrollar a continuación, es que una explicación tecnológica adecuada debe tener en cuenta al público al que se dirige. Pero una segunda razón es que las tecnologías son hechas por los seres humanos y en algún momento siempre es apropiado considerar el impacto en la vida humana de una tecnología dada. Así que una explicación física nunca es una explicación tecnológica exhaustiva. Por último, si bien el diseño y la producción de artefactos tecnológicos es un complicado conjunto de procesos de interbloqueo y superposición, no es el caso de que sólo haya una manera de proceder en el desarrollo de tecnologías. La forma, la función, los componentes de un artefacto toman la forma que tienen debido a una variedad de circunstancias contingentes, es decir, no hay una sola manera de hacer este trabajo. Es, tal vez, capturar ese sentido de contingencia que es la parte más importante y más difícil de una teoría de la explicación tecnológica.

3.2.- Otras teorías de la explicación

Se han ideado otras teorías de explicación que tratan de dar cuenta de los fenómenos que deben explicarse, apelando a otros factores distintos del mundo natural. Hay, por ejemplo, explicaciones teleológicas, explicaciones sociales y explicaciones psicológicas. Si bien cada uno de ellos puede proporcionar buenas explicaciones para algunas cosas y/o eventos, todos ellos son individualmente inadecuados a los efectos de la explicación tecnológica porque, al igual que las explicaciones físicas, sólo cuentan una parte de la historia. Por lo tanto, una explicación teleológica explica los comportamientos de un fenómeno dado en términos del fin para el que fue construido. Sin embargo, eso no nos dice nada sobre por qué tiene el diseño, que hace o por qué se construye a partir de estos materiales en lugar de estos otros, ni cómo sus piezas trabajan juntas. Del mismo modo, las explicaciones sociales ignoran el mundo físico en el que se incrustan los artefactos. Esto no quiere decir que no haya componentes sociales de una explicación tecnológica adecuada, es sólo que se necesita más que sólo lo social. Por lo tanto, si quiero una explicación de por qué esta presa fue construida aquí, seguramente no será suficiente para apelar a la política involucrada. La geología del sitio juega un papel, así como la disponibilidad de materiales, la idoneidad de su ubicación, etc.

En cuanto a la tecnología, la tarea de construir una teoría general de la explicación ni siquiera ha sido un objetivo, con una excepción que se debe discutir a continuación, ya que no está claro que sea posible un relato general de la explicación en este ámbito de cosas que puedan necesitar explicación. También puede ser el caso de que, dado que existía un concepto erróneo común de que, dado que, se alega, las tecnologías son meras aplicaciones de alguna ciencia u otra, entonces la búsqueda de una explicación tecnológica naturalmente volverá a una explicación científica. De hecho, no está claro lo que se supone que debe explicar una teoría de la explicación tecnológica. Si nos centramos únicamente en los artefactos tecnológicos (dejando los sistemas y las tecnologías sociales a un lado por el momento), el diseño y la función del artefacto pueden necesitar una explicación [Kroes, 1998]. Vamos a referirnos a estos puntos como problemas específicos del artefacto. Asistir a problemas específicos de artefactos es importante, pero también necesitamos explicar el impacto social del artefacto y los valores o la estructura de valor asociados con su desarrollo y evaluación [Winner, 1986]. Cuando se introduce el tema de los valores, las cosas se ponen muy pegajosas muy rápidamente. Algunos argumentarán que los artefactos tecnológicos son láminas de sistemas ideológicos [Winner, 1986], otros afirmarán que están cargados de valor de otras maneras (Kroes, comunicación personal) y otros siguen afirmando que los artefactos son de valor neutral [Pitt, 2000]. En cada uno de estos escenarios puede ser el caso de que son las estructuras de toma de decisiones detrás del desarrollo del artefacto que necesitan ser explicados con el fin de entender cómo un objeto llegó a ser lo que es y hacer lo que hace. Desarrollar una teoría de explicación para estos últimos temas nos llevará más y más lejos de la tarea de explicar características específicas de artefactos específicos. A largo plazo, esto es lo que podría ser necesario; para explicar alguna característica de un artefacto puede requerir que en última instancia tenemos que explicar la motivación para su surgimiento, que a su vez requerirá una explicación del sistema social y económico del que surgió, etc. Sin embargo, existe el peligro de tomar sólo esta dirección. Pasar a este modo corre el riesgo de caer bajo el seductor hechizo del constructivismo social y su mantra, "es social hasta el final". Sin embargo, no es el caso de que todo sea social, no, al menos de alguna manera no trivial. Sin embargo, reconocer lo social permite distinguir entre explicaciones específicas de artefactos y explicaciones sociales. Esta es una distinción que resultará útil a medida que exploramos el tipo de explicación que buscamos con respecto a lo tecnológico.

Una zona no constructivista que ha intentado explicar el desarrollo técnico o tecnológico en términos generales es la economía. Al igual que la mayoría de los relatos económicos, el atractivo para el interés propio racional, las fuerzas del mercado, los escenarios evolutivos o los conflictos de clases, presenta una visión estrecha de los factores involucrados en nuestro complicado mundo técnico (véase [Elster, 1983]). Por razones explicadas a continuación, la explicación técnica no puede basarse en lo que equivale a una crítica ideológica en la terminología económica. Más aún, los economistas de varias tendencias, se han preocupado por explicar el cambio tecnológico en términos económicos, lo que no es lo mismo que ofrecer una explicación tecnológica.

4.- PREGUNTAS Y AUDIENCIAS INTERNAS Y EXTERNAS

Volviendo a cuestiones específicas de artefactos, encontramos que un examen minucioso de sus demandas explicativas nos lleva más allá de lo específico a un nivel de mayor generalidad, aunque no sea universal. La cuestión de la demanda explicativa es crucial para desentrañar el problema de la explicación tecnológica. Si, como están de acuerdo los escritores desde Hempel hasta Achinstein, explicaciones científicas son respuestas a las preguntas de por qué, formar una respuesta adecuada depende en gran medida de quién está haciendo la pregunta y a quién se dirige la respuesta; en otras palabras, una respuesta adecuada depende de la audiencia. Pero las explicaciones son más que respuestas a las preguntas de por qué. También responden a preguntas sobre cómo. Además, hay al menos dos audiencias muy diferentes que hacen preguntas sobre las tecnologías: internas y externas y no es obvio desde el principio qué tipo de pregunta están haciendo y cuál es la mejor manera de responderla.

El público interno está formado principalmente por trabajadores dentro de un contexto tecnológico específico, es decir, ingenieros, diseñadores, etc. Estos son los individuos que participan en el desarrollo de las tecnologías en cuestión. Sus preguntas se refieren a las cuestiones que rodean el diseño, los materiales empleados, la naturaleza del sistema en el que se ajusta la tecnología (más en los sistemas siguientes), cumpliendo con las especificaciones de diseño y así sucesivamente. En resumen, hacen muchas preguntas sobre cómo. El público externo está formado por usuarios de tecnología, emprendedores, desarrolladores, políticos, críticos, etc. Además, con una audiencia externa habrá diferentes demandas de generalidad.

La misma pregunta puede ser formulada por diferentes audiencias, pero puede ser respondida apelando a más o menos detalles. Por ejemplo, si la pregunta es "¿Por qué se encendió esa bombilla?" una respuesta específica podría ser que volteé el interruptor, interpretando así la pregunta como una pregunta. Eso podría ser todo lo que se necesita. Sin embargo, la simple pregunta puede enmascarar una más profunda como "¿de dónde viene la electricidad para alimentar la luz?", lo que es una pregunta más complicada. La respuesta a esa pregunta más profunda podría apelar al concepto de una red eléctrica y a cómo los lugares distintos, como las casas, se conectan a la red y cómo la electricidad se dispersa por un sitio local, como una casa a través de un sistema de cableado. En este contexto, una pregunta de por qué podría ser de la forma "¿Por qué se coloca el interruptor a esa altura?" La respuesta apela a los códigos de construcción y abre la puerta a factores sociales. Una explicación completa de por qué la bombilla está encendida, por lo tanto, requiere una gran cantidad de tierra para ser cubierto, desde el cableado de la casa, la red eléctrica, códigos de construcción. Implica un poco de ciencia, mucho sobre diseño y función y un reconocimiento del papel de lo social. Así que está empezando a parecer una explicación tecnológica va a ser algo complicado. Pero el hecho de que sea complicado no significa que esté desestructurado. La estructura se suministra invocando el concepto de un sistema.

5.- Terminología

Una palabra sobre terminología técnica versus tecnológica. "Tecnológico" se utiliza aquí para discutir los sistemas, tanto mecánicos como sociales, como medios de control y manipulación del medio ambiente, escrito grande y pequeño. "Técnico" se utiliza para referirse principalmente a artefactos y sistemas mecánicos, pero no hay nada crucial en el uso de estos términos de estas maneras. Lo importante es la comprensión de que las explicaciones en el ámbito de lo tecnológico/técnico requieren atractivos para sistemas de complejidad variable. El sistema o sistemas pertinentes constituyen una matriz explicativa que debe ser demarcada con cuidado. Dependiendo del sistema que se invoque, puede ser necesaria una explicación diferente. En este sentido, la construcción de una explicación técnico-tecnológica puede ser más un arte que una ciencia. De hecho, es una función de la habilidad de la persona a la que se le pidió dar la explicación para determinar lo que satisfará al interrogador.

6.- Sistemas

Sin embargo, la noción de un sistema es común a las respuestas adecuadas para las audiencias internas y externas. Un sistema es un conjunto de relaciones entre otras cosas, lugares, artefactos, instituciones sociales e individuos. "Sistema" es una noción más amplia que un concepto similar, "contexto". Un contexto es un conjunto específico de relaciones en un espacio específico y en un momento específico, incluso si ese tiempo es realmente un período prolongado, como la Revolución Científica. "Sistema", sin embargo, denota un conjunto más general y abstracto de relaciones que se pueden representar como esquemas, por ejemplo, como dibujos de línea que muestran varios tipos de conexiones sin que realmente exista un sistema de este tipo en la existencia física. Por lo tanto, cada contexto puede ser visto como un sistema, pero tenga en cuenta que el sistema es un contexto.

El sistema puede ser simple, como la relación entre una persona, el interruptor de luz y la bombilla, o puede ser más complicado involucrar sistemas dentro de sistemas como una red eléctrica y el cableado de una casa. Tras la reflexión encontramos que ningún aspecto de un artefacto se explica nunca de forma aislada, siempre es con respecto a su relación con otra cosa y dondequiera que haya tal relación, real o conceptualmente impuesta, hay un sistema. En su punto más básico, un sistema es una relación estructurada entre dos o más partes. Además, voy a argumentar que, entender que algún artefacto es en sí mismo un sistema o incrustado en un sistema es esencial para poder ofrecer o entender una explicación tecnológica.

Es decir, una buena explicación tecnológica se basa en la idea de que los objetos, la persona y los sistemas están relacionados entre sí de diferentes maneras y la colocación adecuada en el sistema adecuado de la cosa (ampliamente interpretado) que debe explicarse es crucial para poder entender la explicación, así como formular una. Esta es también la razón por la que es tan importante entender quién es la audiencia para una explicación. La persona que ofrece la explicación debe ser capaz de referirse a un sistema que será entendido por la persona a quien está ofreciendo la explicación. A este respecto, entonces y para nuestros fines, el "sistema" se considerará un concepto fundamental y los factores que influyen en una explicación tecnológica adecuada se basarán en consideraciones de los sistemas.

Sin embargo, no basta simplemente con apelar a un sistema, ya que aquí hay dos problemas importantes. Primero se refiere a los sistemas individuales. El segundo se refiere al tipo de información proporcionada en la respuesta. Como se ha mencionado anteriormente, cuando se trata de individuar sistemas, la cuestión es ¿cómo determinamos cuál es el sistema más adecuado para nuestros propósitos en este caso específico? Una manera de abordar este problema es volver a la idea de diferentes audiencias y por qué y cómo preguntas. Si también introducimos la idea de un bucle de avance, podemos empezar a ver cómo se puede identificar el sistema adecuado. El sistema apropiado será el resultado de la audiencia como rey para la explicación. Para determinar a qué audiencia y qué tan complicado es un sistema al que debemos apelar, hacemos preguntas. Volvamos al ejemplo del interruptor de luz. La pregunta inicial es "¿Por qué se encendió la luz?" y la respuesta inicial es "Porque volteé el interruptor" y si no hay más preguntas, entonces la explicación, para esa audiencia, en ese momento, está completa. En este punto podemos, si lo deseamos, asumir además, que el interrogador es miembro de una audiencia externa que no está interesado en seguir haciendo el papel de las bruja y las redes eléctricas. Pero, si el interrogatorio continúa, debemos comenzar a explorar el tipo de respuesta que satisfaría al interrogador y reevaluar nuestra suposición inicial sobre qué tipo de respuesta sería suficiente. Podría venir a la mente que la persona que hace la pregunta podría no ser miembro de la audiencia externa; él o ella podría ser un miembro de la audiencia interna y desea saber la fuente de la electricidad y cómo se construye la red. En resumen, se necesitará un poco de esfuerzo para determinar qué tipo de respuesta satisfará a la persona que busca una explicación. Sin embargo, en algún momento el interrogatorio tiene que terminar — este proceso no es el mismo que el niño de cuatro años preguntando por qué el cielo es azul, no dispuesto a resolver para una respuesta . El punto final práctico de una explicación técnica está marcado por una indicación de satisfacción por parte del individuo que solicita la explicación. Pero, se podría preguntar, ¿esto no termina en un círculo estrecho?: la explicación es suficiente cuando el público está satisfecho y el público está satisfecho cuando la explicación es suficiente. No, no es circular que la explicación sea adecuada cuando el público está satisfecho y el público está satisfecho cuando no tiene más preguntas. Sin embargo, puede ser el caso de que la audiencia esté satisfecha por las razones equivocadas. Este es el segundo problema. Antes de recurrir a ella, tenemos que examinar una propuesta similar a la que acabamos de proponer.

En su artículo de 1975 "Análisis Funcional", Robert Cummins desarrolla un relato de una explicación funcional en contradicción con la teoría DN de Hempel [1965]. Aunque se desarrolla de forma independiente, hay muchas similitudes entre la cuenta de Cummins y parte de lo que se propone aquí. Cummins, por ejemplo, quiere explicar una función biológica en términos de su contribución al correcto funcionamiento de un sistema biológico donde eso se tiene en cuenta en términos de la disposición de un organismo a hacer A en circunstancias C. Emplea lo que él llama una "estrategia analítica", por la que quiere decir, más o menos, contabilizar una función dada mediante el análisis de la misma en sub-funciones. También habla de la organización del organismo en términos de un "programa". Por lo tanto, se puede explicar la función de una sub-función en términos de su contribución al programa del organismo, donde el programa es una descripción de lo que se supone que el organismo para abrir cómo se supone que se comporta.

Ahora, las explicaciones tecnológicas tienen que dar cuenta de algo más que funciones, pero la visión de Cummins apoya, en muchos aspectos, las intuiciones detrás de los sistemas explican, que la explicación tecnológica se está desarrollando aquí. Es especialmente interesante ver cómo maneja la tensión entre buscar sub-funciones cada vez más finas y programas más completos. No ofrece una respuesta sistemática al problema de cuándo dejar de buscar detalles más finos y cuándo confiar en la "sofisticación" del programa. Parece ser un acto de equilibrio que depende sobre el grado de aceptación de la explicación dada, un proceso muy similar a la situación en la explicación de sistemas para tecnologías, que es cómo llegar al punto de parada en la realización de preguntas [Cummins, 1975 ,pp.760-762].

La forma en que se formula una respuesta también puede marcar la diferencia con respecto a su grado de aceptación. Todos estamos familiarizados con el truco de los anunciantes de hacer atractivo su producto, más deseable mediante el uso de frases como "científicamente probado" o "como se muestra en un estudio científico en una universidad importante". Según Dennis Carlat en la edición de junio de 2008 de Wired, son estudios de centavos en la Universidad de Yale, informó que las explicaciones espurias se consideraron más satisfactorias cuando fueron precedidas por la frase "Los escáneres cerebrales indican". Esto sugiere que apelar al valioso conjunto de expertos o experiencia de la audiencia puede lograr satisfacción con una explicación sin lograr realmente un estado de comprensión intelectual genuina; satisfacción aquí es un sistema psicológico en lugar de un estado epistémico. Sin embargo, esto no es más un problema el que enfrentamos cuando los investigadores usan estadísticas falsas o apelan a los datos inventados. A veces los investigadores mienten. A veces, los padres, causantes de la constante "¿por qué?" de su hijo, simplemente conforman una respuesta que el padre sabe que los satisfará. A veces una persona que intenta proporcionar una explicación tecnológica hará un atractivo a algo que cree que podría satisfacer a su audiencia, sabiendo que en realidad es engañosa. Estas cosas suceden, pero, al igual que en la detección del fraude científico, debemos estar constantemente en guardia. El desacreditar la cuenta propuesta no desacredita más que eso que los científicos mentirosos desacreditan todas las investigaciones científicas.

6.1.- Sistema y diseño

Volviendo a la cuestión de explicar los problemas específicos de artefactos podemos ver más lejos la importancia del sistema. Considere algunos de los factores involucrados en la explicación del diseño de un artefacto. Los artefactos no toman las formas que tienen por accidente; están diseñados teniendo en cuenta factores específicos. Algunos de estos factores incluyen cómo se va a utilizar el artefacto, por lo que un factor en el diseño se refiere a cómo el artefacto se relaciona con un sistema de uso más amplio, en su uso interactuará con otros artefactos, o el mundo natural, en sí mismo un sistema de sistemas. Otro factor implica la comercialización de un producto —se venden diseños atractivos y fáciles de usar— aquí parte del sistema está realmente fuera del propio proceso de diseño en la medida en que es el sistema de ventas y consumidores, una causa final aristotélica por así decirlo (véase [Bucciarelli, 1994]). Otra consideración implica el costo, la disponibilidad y la confiabilidad de los materiales, factores que de nuevo implican atractivo para un sistema más amplio y, a su vez, pueden relacionarse con la comercialización y el uso, que a su vez requieren atractivo para los sistemas.

En este punto, estamos en condiciones de responder a una posible objeción a la propuesta de la cuenta. Aquí se ha sugerido que la determinación de la adecuación de una explicación, a modo de responder a las preguntas sobre qué y cómo, es una respuesta directa a la audiencia que hace las preguntas y nuestra capacidad de relacionar la respuesta con los sistemas apropiados. Sin embargo, podría argumentarse que esto no distingue una explicación de una adecuada. Pero ya hemos observado que las respuestas satisfactorias a las preguntas de por qué dirigen al interrogador a la forma en que el artefacto funciona en un sistema, en relación con otros artefactos y otros componentes del sistema. Por lo tanto, si la pregunta es "¿cómo puedo encender la luz?" dirigiendo al interrogador a comenzar encendiendo una vela votiva antes de lanzar el interruptor no contaría como una respuesta adecuada ya que no hay manera de relacionar una acción de este tipo, encender una vela, al sistema eléctrico de manera satisfactoriamente explicativa.

6.2.- Sistema y función

La función es otra característica intrínseca del sistema de un artefacto. La función de un artefacto solo se puede explicar completamente en términos de cómo encaja en un sistema. No importa si estamos hablando de la función como uso o función como en cómo funciona, no podemos escapar atractivos a un contexto más amplio. Incluso si sólo nos preocupa la mecánica del artefacto, todavía estamos empleando un sistema para la explicación, ya que el artefacto en sí es un sistema si tiene más de una parte. La pregunta más grande de por qué hace lo que hace debe implicar una apelación a algo más allá del artefacto en sí. Considere un ejemplo, el motor de combustión interna (ICE). Podemos hacer muchas preguntas con respecto al ICE. ¿Qué hace? Si la respuesta es "transforma la energía", tenemos una respuesta claramente insatisfactoria. Podemos buscar satisfacción moviéndonos en una de las dos direcciones o ambas. Si somos miembros de la audiencia interna; podemos preguntar cómo transforma la energía, buscando una descripción de la mecánica del artefacto. Si somos miembros de la audiencia externa, "Transformar la energía" por sí mismo no nos dice nada de valor. Así que, cambiemos la pregunta. ¿Para qué se utiliza el ICE? "Se utiliza para impulsar un tractor." Ahora estamos llegando a algún lugar, pero también hemos apelado a un sistema incipiente o dos. El primer sistema es el creado por la relación entre el ICE y el tractor.

La segunda es la relación entre el tractor y otra cosa. El tractor es un sistema de piezas que se unen para producir un artefacto que puede, entre otras cosas, arar un campo. Si no supieras nada más, no lo verías como una explicación. Pero si de hecho sabes algo sobre la producción agrícola, y si puedes empezar a ver la utilidad del artefacto en términos de producción de un cultivo, cosechar el cultivo, llevar el cultivo al mercado (sistema de transporte), vender el cultivo (sistema económico), transformándolo en algo utilizable como alimento, etc., entonces la explicación de la función del ICE como un mecanismo para impulsar un tractor comienza a tener sentido. Una respuesta totalmente adecuada requiere también saber cómo el ICE produce energía y para qué se utiliza, lo cual requiere apelaciones a los sistemas.

6.3.- Sistema y estructura

Estructura, el último problema específico del artefacto que se discutirá aquí, también está estrechamente alineado con el diseño de un artefacto y una explicación de por qué un artefacto tiene la estructura que también requiere una apelación a los sistemas. Un diseño es un diseño de alguna estructura u otra. Podemos hablar de la estructura interna o externa de un artefacto. Por ejemplo, en el diseño de un rascacielos moderno, es común configurar el edificio alrededor de una columna de servicios centrales que contiene ascensores, líneas eléctricas y de agua, etc. Cómo se ve la estructura externa es una función de muchos factores, incluyendo la ubicación, códigos de construcción, materiales, costo, estética y, por último, pero no menos importante, el ego del arquitecto y los deseos del individuo o grupo que pone en marcha el diseño. Cada uno de los factores enumerados son en sí mismos sistemas - diferentes tipos de sistemas, sin duda, pero los sistemas sin embargo, al ver cómo se relacionan los diseños estructurales y funcionales podemos ver una serie de cosas. En primer lugar, si simplemente nos fijamos en la estructura externa del edificio, no aprenderíamos mucho al respecto. Mirando la estructura externa sólo revela la estética de su diseño y cómo el edificio se relaciona con su entorno, si se nos proporciona un plan de sitio. Si adoptamos un enfoque político podríamos especular sobre el tipo de declaración de poder que hace el edificio dado su tamaño. Sin embargo, para apreciar completamente el diseño, necesitamos saber más que cómo se ve el edificio y si encaja en su ubicación, necesitamos saber cómo funcionan juntos los componentes estructurales y funcionales. Necesitamos saber, por ejemplo, cómo llegarán allí las personas que trabajan en los pisos superiores. Aquí es donde apelamos a la estructura interna del edificio — el papel del núcleo central en la prueba del conducto del ascensor, junto con los medios para llevar la electricidad al resto del edificio.

Ahora podemos pasar a un relato de lo que significa decir que los tres problemas específicos de artefactos que hemos estado considerando, el diseño, la estructura y la función de un artefacto, se pueden explicar en términos de sistemas. Y aquí podemos diferenciar claramente entre concebir el edificio como un sistema y concebirlo en su contexto. Desde un punto de vista sistémico, no necesitamos pensar en un edificio en particular, podemos hacerlo en términos genéricos. Podemos, por ejemplo, dibujar un rectángulo tridimensional grande en un pedazo de papel. Entonces podemos añadir algunos árboles de figuras de palo, para dar una cierta idea de su tamaño, y tal vez punto en algunos otros edificios para mostrar cómo se supone que cabe en un lugar. Luego nos dirigimos al edificio en sí y al lápiz en el núcleo central, indicando a dónde irán las líneas eléctricas, cómo pueden funcionar las tuberías, planos de plantas esquemáticas. Pero si se trata de un edificio específico en el que estoy trabajando, entonces necesitamos saber exactamente qué tan alto será, dónde se ubicará en la ciudad y qué le hará a la zona ponerlo allí. También necesitamos saber sobre la infraestructura de ubicación, ¿tiene suficiente agua para el edificio, cómo llegará la electricidad al edificio, estacionamiento. Cuando nos dirigimos a la estructura interna del edificio, no basta con decir que cada piso contendrá oficinas, ascensores y salas de descanso; tenemos que mostrar dónde se ubicarán, y cuán grandes serán, patrones de tráfico, etc. Aquí entran en juego algunos factores sociales, ya que tenemos que decidir, por ejemplo, entre un plano de planta abierto y oficinas individuales. En ese caso, ¿cuántas oficinas en la esquina y cuántas ventanas? Podría ser el caso de que el diseño externo del edificio no permite oficinas de esquina ya que las esquinas son estructurales. Aquí el arquitecto debe ser sensible a la política de oficinas y la psicología humana.

Como ya se ha señalado, una explicación es una respuesta, entre otras preguntas, sobre cómo y por qué preguntas. Por lo tanto, ¿por qué este artefacto tiene este diseño? La respuesta será en términos de los factores sistémicos mencionados anteriormente. Si estamos hablando de diseños de automóviles, una posible respuesta podría atraer a las modas estéticas, o la capacidad de intercambio de piezas en diferentes modelos, siempre a algo externo al artefacto en sí. Del mismo modo para la función: un artefacto hace lo que hace con el fin de contribuir al funcionamiento exitoso de un sistema en el que tiene un papel que desempeñar. Para explicar la estructura de un artefacto, apelamos a una variedad de factores sistémicos que contribuyeron a que el artefacto tuviera la estructura que hace. La explicación consiste en posicionar el artefacto con respecto al sistema, de tal manera que responda satisfactoriamente a la pregunta por qué. Por lo tanto, si estamos explicando por qué todos (así parece) los llamados vehículos cruzados tienden no sólo a parecerse, sino que son igualmente feos, podríamos referirnos a la actitud de los propietarios de superioridad social de estos vehículos cultivan. Por lo tanto: "no tenemos que conducir grandes monstruos que consumen gas como Chevrolet Suburban o Ford Expeditions o Land Rovers para tener tracción en las cuatro ruedas, pero para hacerle saber que, compramos coches tan feos que no puede ignorarlos", perverso, pero una vez colocado en un entorno social, la fealdad de estos vehículos se puede explicar de manera satisfactoria.

Hasta ahora nos hemos preocupado por las explicaciones de lo que, por falta de un término mejor, podemos llamar artefactos "duros", automóviles, edificios, martillos. Hemos argumentado que las explicaciones del diseño, la estructura y la función de los artefactos duros implican atractivos para los sistemas en los que están incrustados de una forma u otra. Estas explicaciones son, mínimamente, respuestas a las preguntas sobre cómo y por qué. Pero, hay otros tipos de preguntas que se pueden hacer con respecto a los artefactos duros. Una sencilla y desmontablemente simple es: "¿Qué hace?" Para responder a esta pregunta también necesitamos colocar el artefacto en un sistema. Explicar lo que hace el artefacto implica relacionar una parte del sistema con otra. Por lo tanto, encender un interruptor de luz ordinario conecta la red eléctrica a la bombilla. Al explicar lo que un automóvil, hace apelar inmediatamente al sistema más amplio del mundo social y natural cuando decimos que es un medio de transporte de personas y mercancías de un lugar (que debe definirse en el contexto de un sistema) a otro. Cuando explicamos lo que hace un rascacielos, convertimos el propio edificio en un sistema en el que las personas trabajan, trabajan que pueden implicar comunicarse (a través de diferentes sistemas) con personas en otros lugares (sistema requerido) con el fin de mover bienes y servicios por todo el mundo, apelando así al sistema social más amplio del comercio transnacional.

7.- EL COMPONENTE SOCIAL

La explicación de los artefactos duros implica cada vez más atractivo para el dominio social, a medida que nos alejamos cada vez más de explicar la mecánica del artefacto, es decir, cómo hace lo que hace, a una audiencia interna de, por ejemplo, los ingenieros y las preocupaciones de una audiencia externa que pregunta sobre su impacto en la sociedad. Pero entender lo social en su modo explicativo es entenderlo como un sistema, o un conjunto de sistemas. Algunos ejemplos de sistemas sociales utilizados para explicar las características de los artefactos técnicos duros son los mercados económicos, los sistemas de comunicación, los sistemas jurídicos, los códigos de construcción y las métricas estandarizadas. Pero también hay sistemas no sociales a los que apelamos a través de una explicación como el medio ambiente. Así, el nuevo movimiento llamado arquitectura verde es una respuesta al aumento de la conciencia de los efectos del entorno construido en la ecología del planeta. Tales explicaciones sólo tienen sentido en el contexto del pensamiento de la ecología del planeta como un sistema mismo, algo que parecemos hacer cada vez más.

Además de los artefactos técnicos duros, debemos considerar la naturaleza de las explicaciones en el contexto de diversas tecnologías sociales, es decir, los llamados artefactos blandos. Las tecnologías sociales ayudan a los seres humanos a organizar sus asuntos. A menudo explicamos lo que la gente hace apelando a alguna característica de una tecnología social. Por lo tanto, una respuesta a la pregunta "¿Por qué se desaceleró?" podría ser "Porque el límite de velocidad se redujo". Implícitamente, esta es una explicación a modo de apelación a los poderes reglamentarios de la ley: el comportamiento de uno a menudo se configura por restricciones legales. Los sistemas legales se desarrollan con el fin de proporcionar medios ordenados para resolver conflictos y para dar forma al comportamiento social, son construcciones deliberadas que tienen una función. (Hay un aire de paradoja a la afirmación de que los sistemas jurídicos son construcciones deliberadas cuando se considera lo que a menudo se conoce como sistemas de "derecho común", ya que estos se han desarrollado con el tiempo y, en general, de manera fragmentaria. Sin embargo, es suficiente para nuestros propósitos señalar que no podían haberse desarrollado en absoluto si la idea de una ley no se entendía generalmente. Una vez en su lugar, la sociedad puede añadir leyes como considera que es necesario. Concedido esto es diferente de construir un sistema legal y luego imponerlo a una sociedad, pero común a ambos es la aceptación de la idea de la ley.) Para explicar estas funciones debemos apelar a las necesidades de un sistema diferente: la sociedad.

Llamar a la sociedad un sistema es obviamente problemático. ¿A qué sociedad nos referimos? A veces la sociedad es sinónimo de estado nación, a veces con un grupo histórico/cultural más amplio, por ejemplo, la sociedad occidental, a veces con grupos más específicos como las religiones, a veces con ubicaciones geográficas como el sudeste asiático. Luego hay agrupaciones aún más pequeñas como la mafia, una ciudad, como puerto. A medida que el comercio internacional se vuelve cada vez más global en su estructura e interdependencia, podemos terminar en algún momento, lo que significa el mundo, lo que nos dice muy poco. Por lo tanto, las explicaciones que apelan a la sociedad deben ser específicas de la sociedad o correr el riesgo de estar vacía.

No todas las formas de control social del comportamiento son el resultado de construcciones deliberadas como un sistema legal. Hay limitaciones culturales que pueden no derivarse obviamente de un sistema. Por ejemplo, a menudo es difícil entender factores económicos, a pesar de las teorías económicas, que influyen en el comportamiento que ocurre dentro de un sistema, ya que puede haber sistemas contradictorios en el trabajo, como, al menos en los Estados Unidos, la seguridad económica, servicio público. Aquí es donde es necesario un trabajo cuidadoso identificando las condiciones que se pueden utilizar para aislar factores sistemáticos, para explicar cómo las propias tecnologías sociales pueden desempeñar un papel explicativo.

8.- EXPLICAR FALLAS

Pasamos ahora a otro tema que exige una explicación tecnológica: el fracaso. Las fallas técnicas ocurren en todos los niveles, desde las baldosas en un vehículo de lanzamiento espacial hasta las máquinas de votación, las redes eléctricas, los sistemas de servicios sociales y los sistemas educativos. El análisis y la explicación del fracaso se ordenan bajo el título general de los forenses. Las explicaciones de artefactos técnicos duros involucran la ingeniería forense. Los forenses de ingeniería se pueden ver como una forma de ingeniería inversa, durante el cual se desmonta un mecanismo para ver qué lo hace funcionar. En el caso específico de la ingeniería forense, se lleva a cabo una investigación sobre un incidente en el que algún artefacto, mecanismo o sistema, falló con el objetivo de determinar si un artefacto o mecanismo cual fue la causa del fracaso y lo que específicamente salió mal. Los fallos de los sistemas sociales y las tecnologías sociales requieren análisis forenses sociales. Forense social va más allá de la ingeniería forense en el que estas investigaciones examinan el fracaso en el contexto de una situación social, buscando fallas humanas y fallas en el sistema. El punto de la ingeniería y la ciencia forense social es explicar por qué el artefacto o el sistema social no hicieron lo que fue diseñado o evolucionado para hacer. El fallo de artefactos duros suele ser una sorpresa y a veces va acompañado de miseria social o incluso de desastre. El ejemplo del fallo de las alas en el vehículo de lanzamiento del transbordador Challenger nos da un buen caso de una explicación que se ocupa de una parte particular de un complejo sistema de artefactos que no hizo el trabajo que se esperaba hacer, a pesar del hecho de que las demandas colocadas en él excedió sus especificaciones. Se podría argumentar que el error se produjo no tanto debido al fallo del sistema de artefactos, sino debido al sistema social en el que funcionaba. Las advertencias de los ingenieros de que las baldosas fallarían fueron anuladas por otras razones, algunos dicen política [Vaughan, 1996].Este es un ejemplo valioso, porque muestra la complejidad de la relación entre los sistemas de artefactos duros y los sistemas sociales y entre la ingeniería forense y la ciencia forense social. El informe de la Comisión Rogers, el informe oficial de la investigación del gobierno de los Estados Unidos sobre el incidente, identificó la causa específica del desastre como el fracaso de las baldosas, pero también señaló que había otras fallas sistémicas que también debían considerarse. El fracaso de las juntas de las baldosas fue un fallo estructural en el sentido de que esta parte no funcionaba en esta estructura en determinadas circunstancias, circunstancias ajenas a las especificaciones de la parte en cuestión. Se podría argumentar que se trata de una explicación funcional. Pero eso no está claro. Porque cuando apelamos a las circunstancias fuera de las especificaciones de la baldosa, estamos apelando a más que la función del ala. El fracaso de la misión de transbordador como resultado del fracaso de la red de baldosas también puede explicarse en términos del fallo del sistema social que desarrolló, gestionó y utilizó el sistema de transbordadores. Lo que tenemos que evitar aquí es hacer del sistema social la explicación de todo lo que salió mal, de esa manera se pone la retórica de la crítica social, pero hace poco para explicar el fracaso de una manera que conduce a correcciones que realmente hacen la diferencia. En resumen, apelar sólo a lo social tiene el efecto del lado oscuro de la ingeniería.

8.1.- El ejemplo Challenger

En la discusión del desastre del Challenger, a menudo se plantea la cuestión de las responsabilidades de los ingenieros involucrados. ¿Es suficiente para los ingenieros diseñar artefactos que cumplan con las especificaciones del cliente o tienen más responsabilidades para determinar si esas especificaciones son razonables dadas las funciones del producto final? Plantear estas cuestiones también permite distinguir entre buscar causas de fracaso y evaluar la culpa. Por un lado queremos saber qué se rompió y por qué. Por otro lado, queremos saber quién fue el responsable de la situación. En el primer caso buscamos explicaciones tecnológicas, en el segundo, judiciales o incluso morales. Puede ser el caso de que una resolución definitiva de toda la situación requiera evaluar la culpa y establecer restricciones para corregir las acciones o inacciones que se produjeron que conllevan el problema. Pero no está claro que hacerlo sea una parte necesaria de una explicación tecnológica, interpretada como un resultado de la ingeniería forense. Sin embargo, Uno podría argumentar, que es un punto final necesario para los forenses sociales, ya que no es suficiente saber por qué el sistema falló, pero lo que hay que hacer para solucionarlo y a veces eso significa identificar a las personas como incompetentes, instituir la revisión de procesos, estableciendo lo que equivale a directivas morales, etc.

8.2.- El ejemplo de las elecciones presidenciales estadounidenses de 2000

También se puede argumentar que podemos explicar los resultados de las elecciones presidenciales de estados Unidos de 2000, tanto en términos de un fallo técnico de artefactos duros como de un conjunto de fracasos de las tecnologías sociales en las que se incrustó. Los llamados chats colgantes, fueron el resultado de la incapacidad de las máquinas de votación en Florida para funcionar correctamente. Las decisiones resultantes de los funcionarios estatales y finalmente de la Corte Suprema de los Estados Unidos pueden ser vistas como fracasos de los sistemas sociales y políticos. Las leyes se rompieron, pero no se tomó ninguna medida por parte de funcionarios estatales o incluso funcionarios federales para identificar a las personas responsables y hacer que fueran procesados. En el segundo caso, tenemos la política de nombramiento judicial al más alto nivel que supera el precedente legal y los procedimientos especificados por la Constitución de los Estados Unidos.

8.3.- El ejemplo de accidente ferroviario de Ladbroke Grove

Por último, debemos examinar un tipo diferente de caso de fracaso, que también conduce al desastre. Esta es una en la que las agendas políticas no parecían desempeñar un papel importante, pero los casos agravados de negligencia humana llevaron a un resultado triste y se puede argumentar, no hubo un fracaso técnico específico. El caso en cuestión es el accidente ferroviario de Ladbroke Grove en las afueras de Londres, Inglaterra, el 5 de octubre de 1999. Aproximadamente a las 8 de la mañana, dos trenes que viajaban a altas velocidades chocaron, resultando en 31 muertes y otras 523 bajas. La causa inmediata fue identificada por una investigación oficial como el fracaso del ingeniero de uno de los trenes para obedecer una señal de parada. Sin embargo, El estudio posterior, reveló una historia más complicada. El operador del tren que perdió la señal roja sólo había estado en el trabajo durante dos meses. La señal en sí no era estándar, estructurada como una "L" invertida. La señal roja estaba situada a la izquierda de las otras luces, en lugar de en la parte inferior de una matriz de tres luces estándar. Además, la señal estaba oscurecida de la vista por las carreteras aéreas y el sol brillante. Por último, los responsables del mantenimiento de la vía y sus señales no habían tomado las medidas necesarias para corregir los problemas en este sitio, a pesar de que había habido ocho casos de trenes que no tenían la señal roja allí en los seis años anteriores — afortunadamente todos esos trenes lograron detenerse antes de que ocurriera un accidente. La frecuencia de tales ocurrencias debería haber alertado a alguien de un problema. Si bien la señal había funcionado correctamente, aparentemente había habido una serie de acontecimientos que contribuyeron a la tragedia final que nadie se había molestado en conectar. Sí, hubo un fallo del sistema, pero no por ambición ciega o codicia o estupidez. En este caso, parece que una serie de pequeños cambios a lo largo del tiempo dieron lugar a una situación que nadie había anticipado, a pesar de una serie de señales de advertencia a lo largo de los años. Sin embargo, en este caso, la investigación oficial dirigida por Lord Cullen dio lugar a multas récord, lo que sugiere que hubo una clara determinación de culpa.

9.- CONCLUSIONES Y OBJETIVOS

9.1.- Una defensa final de los sistemas

Se puede objetar que este relato de la explicación tecnológica es inadecuado; es simplemente demasiado suave, descansando como lo hace en las habilidades inter personales en lugar de conexiones lógicas rigurosas. Como hemos visto, el uso de las preguntas por qué iteradas proporciona un método tanto para dividir los sistemas como para localizar la explicación adecuada. Es decir, al averiguar qué tipo de marco proporcionará entendimiento en nombre de un investigador, aseguramos que la explicación tecnológica/técnica realmente responde a la pregunta y, como hemos sugerido, responder a cómo y por qué preguntas, es de qué se trata la explicación. Esto también ayuda con respecto a otra cuestión, hasta ahora inexplorada: cómo determinar cuál es exactamente la pregunta. Anteriormente se observó que el interrogatorio se desarrolla en la forma de un bucle de retroalimentación. El punto aquí es tanto para averiguar lo que el interrogador está haciendo realmente como llegar a una respuesta satisfactoria. De hecho, hasta que tanto el interrogador como la persona que busca dar la explicación sepa cuál no es una explicación satisfactoria.

9.2.- Fracaso, éxito y simetría

Todavía hay una objeción final (por el momento): la aparente asimetría entre la explicación tecnológica de por qué algo funciona y por qué algo falla. En la superficie parece como si la explicación de por qué funciona algo es que está de acuerdo con los procesos generales que entendemos. En el caso de por qué algo falla, apelamos a los detalles del caso.

Hay dos problemas diferentes aquí. Una vez más vemos las influencias no deseadas de los debates más antiguos sobre nuestras expectativas acerca de las preocupaciones actuales. En particular, vemos la influencia continua de Carl Hempel. Hempel estableció la condición de simetría para las estructuras lógicas tanto de la explicación como de la predicción. Es decir, en DN la misma forma lógica caracteriza tanto las explicaciones como las predicciones; ambos son argumentos deductivos con sus premisas que contienen una ley y declaraciones de condiciones iniciales, lo que conduce a una declaración de hecho x, (si uno está explicando hechos individuales) o la declaración de una predicción que x ocurrirá. Si uno toma, por analogía, la predicción para aplicar a por qué las cosas funcionan y la explicación para aplicar a los fracasos, puede haber algo con que trabajar. Es decir, podría parecer que la objeción a la asimetría en las explicaciones tecnológicas tiene algún motivo. Esto supone que las objeciones planteadas anteriormente al modelo DN no se aplican a esta cuestión de simetría. Pero lo hacen, porque en las explicaciones DN necesitamos saber qué leyes usar, y no podemos suponer que sólo hay una teoría en uso a la vez. Si los problemas producidos por las cuestiones de individuación de las leyes y las teorías que compiten son problemas reales, entonces DN falla de maneras profundamente serias, y el llamado a la simetría de las estructuras lógicas parecería fallar también. En resumen, no está claro que la explicación de por qué algo funciona debe tener la misma estructura lógica que una explicación de por qué algo no funciona.

Además, rara vez se da el caso de que una explicación de por qué algo funciona debe apelar a la experiencia de un operador o a la coherencia de un sistema. Esos se dan por sentados cuando hacemos un paseo de un artefacto. Del mismo modo, la presunción desde el principio es que las piezas están correctamente diseñadas y fabricadas. Por lo tanto, cuando explicamos por qué la luz se enciende en la casa cuando giro el interruptor, es en el contexto de una cláusula ceteris paribus muy grande. Todas las cosas son iguales, si los objetos están correctamente diseñados y fabricados y si los operadores están debidamente entrenados y competentes y concienzudos, y si el sistema en su conjunto funciona bien, entonces cuando hago X, puedo esperar Y.

Las explicaciones más difíciles se refieren a los fallos, para explicar el fracaso requiere que descubramos qué componentes del ceteris paribus deberíamos haber pensado dos veces y qué era en aquellos componentes que necesita arreglar. En resumen, hay una asimetría incorporada en las explicaciones tecnológicas y eso no es necesariamente algo malo; considerar lo que sucedería si este no fuera el caso.

Si no hubiéramos podido operar con la cláusula ceteris paribus muy grande, que entre corchete nuestras explicaciones de por qué funcionan las cosas, tendríamos que construir en todas las restricciones que está diseñado para lavar y el resultado final sería éxtasis. Por lo tanto, consideremos nuestro interruptor de luz. La luz se enciende en la habitación cuando giro el interruptor sólo cuando el interruptor está correctamente fabricado y cableado, pero sabemos que los electricistas cometen errores en el cableado de las cosas, y sabemos que los materiales utilizados en la fabricación pueden ser defectuosos, por lo que el interruptor, incluso si está correctamente construido, puede no funcionar correctamente. Pero sabemos que no estamos justificados al suponer que el interruptor está correctamente y construido porque los operadores de la planta de fabricación que hacen los desentendidos también cometen errores, a veces porque están mal entrenados, o porque tuvieron una pelea con su marido o esposa, o porque tomaron dos cervezas en el almuerzo. Saber todo lo que puede salir mal sólo con el interruptor; No seré capaz de explicar por qué la luz se enciende porque hay demasiado que puede salir mal en el sistema en su conjunto. Una explicación con todas esas advertencias no es una explicación.

Por otro lado, profundizar en esas suposiciones la cláusula ceteris paribus se esconde cuando no querer explicar el fracaso es justo lo que hace que tales explicaciones sean tan difíciles de construir, pero también tan valiosas. Aquí tenemos que descubrir las mismas cosas que necesitábamos ignorar antes. No porque sean necesariamente parte de la explicación final, sino porque podrían serlo, e ignorar esas posibilidades es ofrecer sólo una explicación superficial, que, de nuevo, no es una explicación en absoluto.

En conclusión, la asimetría entre explicar cómo funcionan las cosas y por qué fracasan es esencial para proporcionar explicaciones tecnológicas. En el caso de explicar el éxito tenemos que simplificar, y en el caso de explicar el fracaso debemos complicarnos mucho. Esto no quiere decir que las explicaciones de por qué las cosas funcionan no pueden ser complicadas, ciertamente pueden serlo. El punto aquí es que los tipos de complicaciones son de un orden diferente cuando tratamos de explicar por qué las cosas no funcionaron como esperábamos. Las complicaciones tienen que ver con los factores humanos, individuales o agregados. Esto también explica por qué no culpamos a los artefactos cuando las cosas van mal, culpamos a las personas que usan o hacen mal uso o abusan de ellos. Por lo tanto, es cierto que las armas no matan, la gente lo hace.

REFERENCIAS

[Achinstein, 1964] Peter Achinstein, Models, Analogies, and Theories. Philosophy of Science, 31, 328–350, 1964.

[Achinstein, 1965] Peter Achinstein, Theoretical models. British Journal for the Philosophy of Science, 16, 102–120, 1965.

[Addison, Henkin, Tarski, 1965] John W. Addison, Leon Henkin, Alfred Tarski (eds.), The Theory of Models. Proceedings of the 1963 International Symposium at Berkeley, North-Holland, 1965.

[Alberti, 1755] Leon Battista Alberti, De ReAedificatoria Libri X. Alamani, 1485; English translation by James Leoni of the Italian translation by Cosimo Bartoli, Firenze, 1550. (The) Ten Books of Architecture. Reprint of the edition of London 1755; Tiranti, 1955.

[Alberti, 1847] Leon Battista Alberti, Della Statua, in Opere Volgari di Leon Battista Alberti vol. 4, Tipografia Galileiana, 1847.

[Apt and Pellegrini, 1994] K.R.AptandA.Pellegrini.Ontheoccur-checkfreePrologprograms. ACM Toplas, 16, 687–726, 1994.

[Ashby, 2003] N. Ashby. Relativity in the global positioning system. Living Reviews in Relativity, 6, 2003. www.livingreviews.org/.

[Astesiano et al., 2002] E. Astesiano, M. Bidoit, H. Kirchner, B. Krieg-Brueckner, P. D. Mosses, D. Sannella, and A. Tarlecki. CASL: the common algebraic specification language. Theoretical Computer Science, 286, 153–196, 2002.

[Ayer, 1936] Alfred Jules Ayer, Language, Truth and Logic, Gollancz, 1936.

[Bacon, 1620] Francis Bacon, Novum Organum Scientiarum. Billium, 1620. (Edition of 1994). Engl. translation: The Instauratio Magna, Part II: Novum Organum and Associated Texts. Text in Latin with parallel English translation; ed. with introduction, notes, commentaries by Graham Rees with Maria Wakely. Clarendon Press, 2004.

[Bacon, 1627] Francis Bacon, New Atlantis (1624). A work unfinished. Edited by W. Rawley. John Havilland for William Lee, 1627.

[Baernstein and Hull, 1931] H. D. Baernstein and Clark Leonard Hull, 'A mechanical model of the conditioned reflexes', Journal of General Psychology, 5, 99–106, 1931.

[Bailer-Jones, 1999] D. M. Bailer-Jones. Tracing the Development of Models in the Philosophy of Science. In Lorenzo Magnani, Nancy J. Nersessian and Paul Thagard (eds.), Model-Based Reasoning in Scientific Discovery. New York: Kluwer, 23-40, 1999.

[Bailer-Jones, 2003] D. M. Bailer-Jones. When Scientific Models Represent, International Studies in the Philosophy of Science 17: 59-74, 2003.

[Balzer et al., 1987] W. Balzer, C. U. Moulines, and J. D. Sneed. An Architectonic for Science. Reidel, Dordrecht, 1987.

[Bartels, 2006] A. Bartels. Defending the Structural Concept of Representation, Theoria 55, 7-19, 2006.

[Barwise and Etchemendy, 1994] J. Barwise and J. Etchemendy. Hyperproof. CSLI, Stanford CA, 1994.

[Beaufoy, 1834] M. Beaufoy. Nautical and hydraulic experiments. Private Press of Henry Beaufoy, London, 1834.

[Becker, 1976] H. A. Becker. Dimensionless Parameters: Theory and Methodology. Wiley, 1976.

[Beltrami, 1868] Eugenio Beltrami, 'Saggio di interpretazione della geometria non-euclidea', Giornale di Mathematiche, 6, 284–312, 1868.

[Bernoulli, 1738] D. Bernoulli. Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii. Johann Reinhold Dulsseker, Strasbourg, 1738.

[Bertels and Nauta, 1969] K. Bertels and D. Nauta. Inleiding tot het modelbegrip. Wetenschappelijke Uitgeverij B.V., Amsterdam, 1969. In Dutch.

[Beth, 1932] H. J. E. Beth. Newton's "principia", volume 2 of Historische Bibliotheek voor de Exacte Wetenschappen. P. Noordhoff, Groningen—Batavia, 1932. In Dutch.

[Bennett and Ward, 1933] George K. Bennett and Lewis B. Ward, 'A model of the synthesis of conditioned reflexes', American Journal of Psychology, 45.2, 339 — 342, 1933, .

[Bernzen, 1986] Rolf Bernzen, Die praktische und theoretische Konstruktion des Modellverfahrens. Ein Beitrag zur Fru¨hgeschichte der neuzeitlichen Wissenschaft. Peter Lang, 1986. [Bissell, 1990] D. Bissell, The Father of Computer Graphics: Todays graphics systems owe their existence to an innovative graduate school project called Sketchpad. Byte, June, 380-381, 1990.

[Birkhoff, 1960] G. Birkhoff. Hydrodynamics: A Study in Logic, Fact and Similitude. Princeton University Press, 1960. [Bridgman, 1931] P. Bridgman. Dimensional Analysis. Yale University Press, 1931.

[Black, 1962] Max Black, Models and Metaphors. Studies in Language and Philosophy. Cornell University Press, 1962. [Bljacher, 1982] Leonid J. Bljacher, Geschichte der Biologie. Theorien, Methoden, Institutio- nen, Kurzbiographien (russ. 1975). Fischer, 1982, 2. ed. 1985.

[Boltzman, 1902] Ludwig Boltzmann, 'Model', in Encyclopedia Britannica, 1902; reprinted in Ludwig Boltzmann, Theoretical Physics and Philosophical Problems, Brian McGuinness, ed. Reidel, pp. 213–220, 1974.

[Boon, 2006] M. Boon. How Science is applied in Technology, International Studies in the Philosophy of Science 20(1): 27-47, 2006. [Boon, forthcoming] M. Boon.

Understanding according to the Engineering Sciences: Interpretative Structures. In Henk De Regt et al. (eds.), Scientific Understanding: Philosophical Perspectives, University of Pittsburgh Press, forthcoming.

[Boumans, 1999] Marcel Boumans, Built-in justification. In [Morgan and Morrison, 1999], pp. 66–96, 1999. [Bridgman, 1922] Percy Williams Bridgman, Dimensional Analysis. Yale University Press, 1922.

[Boumans, 1999] M. Boumans. Built-In Justification. In Mary S. Morgan and Margaret Morrison (eds.), Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science. Cambridge: Cambridge University Press, 66-96, 1999.

[Boltzmann, 1902] L. Boltzmann. Model. In Encyclopaedia Britannica, volume XXX, pages 788–791. The Times Printing House, London, 10th edition, 1902. Freely accessible through: http://www.1911encyclopedia.org/Model.

[Bridgman, 1973] P. W. Bridgman. Dimensional Analysis, volume 7, pages 439–449. Encyclopaedia Britannica, 1973.

[Bucciarelli, 1994] L. L. Bucciarelli. Designing Engineers. Cambridge, MA: MIT Press, 1994.

[Buckingham, 1914] E. Buckingham. On Physically Similar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Equations, Physical Review 4: 345-376, 1914.

[Bunge] M Technology as Applied Science. Technology and Culture, 7:329–347, 1966.

[Byrne, 2008] Ruth Byrne, Mental Models Website, http://www.tcd.ie/Psychology/Ruth Byrne/mental models/

[Carnap, 1942] Rudolf Carnap, Introduction to Semantics, Harvard University Press, 1942.

[Carnap, 1995] R. Carnap. An Introduction to the Philosophy of Science. Dover Publications, Inc, New York, 1995. This is an unabridged, corrected republication of the 1974 edition of the work originally published by Basic Books, inc, New York, 1966, under the title 'Philosophical Foundations of Physics: An introduction to the Philosophy of Science'.

[Carlat, 2008] D. Carlat. Mind Readers. Wired, June, pp. 120-128, 2008.

[Carroll, 1996] Lewis Carroll, The Complete Illustrated Lewis Carroll, Ware, 1996.

[Carnot, 1986] S. Carnot. Reflexions on the Motive Power of Fire. Translated and edited by Robert Fox, New York, Manchester University Press, 1986 [1824].

[Campbell, 1920] N. R. Campbell. Physics: The Elements. Cambridge, 1920.

[Carathedory, 1917/1948] C. Carathedory. Vorlesungen über Reelle Funktionen. New York: Chelsea Publishing Company, 1948. (First edition 1917).

[Cartwright, 1983] N. Cartwright. How the Laws of Physics Lie. Oxford: Clarendon Press, 1983.

[Cartwright, 1999] N. Cartwright. The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

[Cheney and Kuczura, 1976] Thomas K. Cheney and Anatol Kuczura, Small Modular Communications Switching System with Distributed Programmable Control, US Patent 3,974,343, 1976. [Clymer, 1955] Floyd Clymer, Henry's Wonderful Model T. 1908–1927. McGraw-Hill, 1955.

[Choquet, 1953] G. Choquet. Theory of capacities, Annales de l'Institut Fourier, 5, 131—295, 1953.

[Clark, 1997] A. Clark. Being There: Putting the Brain, Body, and World Together Again. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.

[Clausius, 1865] R. Clausius. The Mechanical Theory of Heat with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies. London: John van Voorst, 1 Paternoster Row, 1865.

[Codd, 1970] E. F. Codd, 'A relational model of data for large shared data banks', Communications of the ACM 13 (6), 377 — 387, 1970.

[Cohen and Drabkin, 1948] M. R. Cohen and I. E. Drabkin. A source book in Greek Science. Source books in the history of the sciences. McGraw-Hill book company, Inc, 1948.

[Cohen, 2001] D. L. Cohen. Demystifying Electromagnetic Equations: A Complete Explanation of EM Unit Systems and Equation Transformations. SPIE Press, 2001.

[Cooper, 1872] T. Cooper. Men of Time. A Dictionary of Contemporaries. Routledge, London, 1872.

[Cornelius et al, 1964] P. Cornelius, W. de Groot and R. Vermeulen. Quantity Equations and System Variation in Electricity, Physica 30: 1446-1452, 1964.

[Cornelius et al., 1965a] P. Cornelius, W. de Groot and R. Vermeulen. Quantity equations, rationalization and change of number of fundamental quantities I, Applied Scientific Research, Section B, Vol. 12, No. 1. Pp. 1-17, 1965.

[Cornelius et al, 1965b] P. Cornelius, W. de Groot and R. Vermeulen. Quantity equations, rationalization and change of number of fundamental quantities II, Applied Scientific Research, Section B, Vol. 12, No. 1. Pp. 235-247, 1965.

[Cornelius et al, 1965c] P. Cornelius, W. de Groot and R. Vermeulen. Quantity equations, rationalization and change of number of fundamental quantities III, Applied Scientific Research, Section B, Vol. 12, No. 1, January 1965. Pp. 248-265, 1965.

[Cotgrave, 1611] Randle Cotgrave, A Dictionary of the French and English Tongues, Islip, 1611.

[Cox, 1988] Donna J. Cox, 'Renaissance Teams and Scientific Visualization: A Convergence of Art and Science', Collaboration in Computer Graphics Education, SIGGRAPH 88 Educator's Workshop Proceedings, pp.81–104, 1988.

[Craik, 1943] Kenneth J .W. Craik, The Nature of Explanation, Cambridge University Press, 1943.

[Cummins, 1975] R. Cummins. Functional Analysis. The Journal of Philosophy 72, 741-765, 1975.

[Davidson and Suppes, 1956] Donald Davidson and Patrick Suppes, 'A finitistic axiomatization of subjective probability and utility', Econometrica, 24, 264–275, 1956.

[da Costa and French, 1990] N. C. A. da Costa and S. French. The Model–Theoretic Approach in the Philosophy of Science, Philosophy of Science 57: 248–265, 1990.

[Dehornoy, 1995] P. Dehornoy. From large cardinals to braids via distributive algebra. Journal of Knot Theory and Ramifications, 4–1, 33–79, 1995.

[de Ridder, 2007] J. de Ridder. Reconstructing Design, Explaining Artifacts: Philosophical Reflections on the Design and Explanation of Technical Artifacts. Simon Stevin Series in the Philosophy of Technology Vol. 4 (Ph.D. Dissertation), Delft University of Technology, Department of Philosophy, 2007.

[de Roever and Engelhardt, 1998] W.-P. de Roever and K. Engelhardt. Data Refinement: Model Oriented Proof Methods and their Comparison. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.

[Dowty et al., 1981] D. R. Dowty, R. E. Wall, and S. Peters. Introduction to Montague Semantics. Reidel, Dordrecht, 1981.

[Diderot and D'Alembert, 1765] Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers, Faulche, vol. X, 1765.

[Digges, 1576] Leonard Digges, A Prognostication Everlastings, corrected and augmented by Thomas Digges, 1576.

[Dirichlet, 1871] P. G. Lejeune Dirichlet, Vorlesungen über Zahlentheorie, mit Zus¨atzen von R. Dedekind, Vieweg, 1871. Engl. translation: Lectures on Number Theory. A translation by John Still well.Vol.16 of History of Mathematics. American Mathematical Society, Providence, RI, 1999.

[Duhem, 1996] Pierre Duhem, The English School and Physical Theories: On a Recent Book by W. Thomson (1893). In Pier Duhem, Essays in History and Philosophy of Science, pp. 50–74, Hackett, 1996.

[Duncan, 1953] W. J. Duncan. Physical Similarity and Dimensional Analysis. Edward Arnold and Co., 1953.

[Eckhardt, 1987] Roger Eckhardt, 'Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo method', Los Alamos Science Special Issue, 131 — 136, 1987.

[Escher, 1992] M. C. Escher, Escher: The Complete Graphic Work, edited by F. H. Bool, Bruno Ernst, J. R. Kist, J. L. Locher and F. Wierda, Thames and Hudson, 1992.

[Euclid, 1956] Euclid, The Thirteen Books of the Elements, Vol. 3, translated and edited by Thomas L. Heath, Dover Publications, 1956.

[Erlichson, 1999] H. Erlichson. Sadi Carnot, 'Founder of the Second Law of Thermodynamics', European Journal of Physics 20: 183-192, 1999.

[Elgin, 1996] C. Z. Elgin. Considered Judgment. Princeton: Princeton University Press, 1996.

[Elgin, 2004] C. Z. Elgin. "True Enough." Philosophical Issues 14 (2004): 113-31.

[Ellis, 1966] B. Ellis. Basic Concepts of Measurements. Cambridge University Press, 1966.

[Ehrenfest-Afanassjewa, 1916] T. Ehrenfest-Afanassjewa. Der Dimensionsbegriff und der analytische Bau physikalischer Gleichungen, Mathematische Annalen, 1916.

[Ellis, 1966] B. D. Ellis. Basic Concepts of Measurement. Cambridge University Press, 1966.

[Ellis, 1992] B. D. Ellis. Conventialism in Measurement Theory. In C. W. Savage and P. Ehrlich, eds., Philosophical and Foundational Issues in Measurement Theory. Lawrence Erlbaum, pp. 167–180, 1992.

[Elster, 1983] J. Elster. Explaining Technical Change, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1983.

Falmagne, 1971] J. C. Falmagne. The generalized Fechner problem and discrimination. Journal of Mathematical Psychology, 8, 22—43, 1971.

[Falmagne, 1974] J. C. Falmagne. Foundations of Fechnerian psychophysics. In Contemporary Developments in Mathematical Psychology Vol. 2, D.H. Krantz, R.C. Atkinson, R.D. Luce, and P. Suppes, eds., pp. 127—159. San Francisco, CA: Freeman, 1974.

[Falmagne, 1976] J. C. Falmagne. Random conjoint measurement and loudness summation. Psychological Review, 83, 65—79, 1976.

[Falmagne, 1977] J. C. Falmagne. Weber's inequality and Fechner's problem. Journal of Mathematical Psychology, 16, 267—271, 1977.

[Falmagne, 1978] J. C. Falmagne. A representation theorem for finite random scale systems. Journal of Mathematical Psychology, 18, 52—72, 1978.

[Falmagne, 1979] J. C. Falmagne. On a class of probabilistic conjoint measurement models: Some diagnostics properties. Journal of Mathematical Psychology, 19, 73—88, 1979.

[Falmagne et al, 1979] J. C. Falmagne, G. Iverson, and S. Marcovici. Binaural "loudness" summation: Probabilistic theory and data. Psychological Review, 86, 25—43, 1979.

[Falmagne and Iverson, 1979] J. C. Falmagne and G. Iverson. Conjoint Weber laws and additivity. Journal of Mathematical Psychology, 20, 164—183, 1979.

Falmagne, 1980] J. C. Falmagne. A probabilistic theory of extensive measurement. Philosophy of Science, 47, 277—296, 1980.

[Falmagne, 1985] J. C. Falmagne. Elements of Psychophysical Theory. London and New York: Oxford University Press, 1985.

[Fechner, 1860/1966] G. T. Fechner. Elemente der Psychophysik. Leipzig: Druck and Verlag von Breitkopfs Härtel. Translated by Helmut E. Adler. Elements of Psychophysics (Vol. 1). New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1860/1966.

[Feynman, 1990] R. P. Feynman. QED: The Strange Theory of Light and Matter. Penguin Books, London, 1990.

[Feynman et al., 1963] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands. The Feynman Lectures on Physics, Volume I. Addison-Wesley, Reading Mass., 1963.

Frigg R. and Hartmann. S. 'Models in Science'. The Stanford Encyclopedia of Philosophy (2006 Edition),

[Ferguson, 1992] Eugene S. Ferguson, Engineering and the Minds Eye. MIT Press, 1992.

[Fink, 1890] Karl Fink, Kurzer Abriss einer Geschichte der Elementar-Mathematik. Laupp, 1890; English translation: A Brief History of Mathematics. Open Court Publishing Co., 1910.

[Fodor, 1983] Jerry A. Fodor, The Modularity of Mind, MIT Press 1983.

[Ford, 1993] Brian J. Ford, Images of Science. A History of Scientific Illustrations. British Library, 1992; Oxford University Press, 1993.

[Frege, 1959] Gottlob Frege, Die Grundlagen der Arithmetik, with translation by J. L. Austin, Blackwell, 1959.

[Frigg and Hartmann, 2008] Roman Frigg and Stephan Hartmann, 'Models in Science', Stanford Encyclopedia of Philosophy, http://plato.stanford.edu.

[Freud, 1895] Sigmund Freud, Project for a scientific psychology. In The Standard Edition of the Complete Psychological Works of Sigmund Freud, J. Strachey (ed.) Vol. 1, pp.283-398. Hogarth Press, 1966. Originally written 1895.

[Frontinus, 1899] Sextus Julius Frontinus, De Aquaeductu Urbis Romae. Ed. with introduction and commentary by R. H. Rodgers. Cambridge University Press 2004; Engl. translation: The Two Books on the Water Supply of the City of Rome. A photographic reproduction of the sole original Latin Ms. and its reprint in Latin; also a translation into English and explanatory chapters, by Clemens Herschel. Estes 1899; Longmans 1913; reprint New England Water Works Association, 1973

[French, 2003] S. French. A Model-Theoretic Account of Representation (Or, I Don't Know Much About Art...but I Know It Involves Isomorphism). Philosophy of Science, 70, 1472- 1483, 2003.

[French and Ladyman, 1999] S. French and J. Ladyman. Reinflating the Semantic Approach, International Studies in the Philosophy of Science 13, 2: 103-121, 1999.

[Frigg, 2002] R. Frigg. Models and Representation: Why Structures Are Not Enough. Measurement in Physics and Economics Discussion Paper Series. London: London School of Economics, 2002.

[Frigg, 2006] R. Frigg. Scientific Representation and the Semantic View of Theories, Theoria 55, 49-65, 2006.

[Franklin, 1769] B. Franklin. To sir John Pringle. In Experiments and Observations on Electricity: made at Philadelphia in America, pages 492–496. Printed for David Henry, and sold by Francis Newberry, London, 1769. Freely available: http://www.franklinpapers.org/franklin/framedVolumes.jsp?tocvol=10.

[Froude, 1868] W. Froude. Observations and suggestions of the subject of determining by experiment the resistance of ships. In The papers of William Froude M.A. LL.D., F.R.S. 1810–1879, pages 120–127. The institution of naval architects, 1868.

[Froude, 1869] W. Froude. The state of exiting knowledge on the stability, propulsion and sea-going qualities of ships, and as to the application which it may be desirable to make to her majesty's government on these subjects. In The papers of William Froude M.A. LL.D., F.R.S. 1810–1879. The institution of naval architects, 1869.

[Froude, 1872] W. Froude. Experiments of the surface-friction experienced by a plane moving through water. British Association for the Advancement of Science, 42:118–124, 1872.

[Froude, 1874] W. Froude. On experiments with H.M.S. Greyhound. Transactions of the Institution of Naval Architects, XV: 37–73, 1874.

[Froude, 1888] R. E. Froude. The constant system of notation of results of experiments on models used at the admiralty experiment works. Transactions of the Institution of Naval Architects, 29, 1888.

[Galilei, 1638] G. Galilei. Two New Sciences, Including Centers of Gravity & Force of Percussion. University of Wisconsin Press, Madison, 1638. Translation: Stillman Drake.

[Galilei, 1638] Galileo Galilei, Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno a due Nuove Scienze, Leida, 1638.

[Gentner and Stevens, 1983] Dedre Gentner, Albert L. Stevens (Eds.), Mental Models. Lawrence Erlbaum, 1983.

[Giere, 1988] R. N. Giere. Explaining Science: A Cognitive Approach. Chicago and London: The University of Chicago Press, 1988.

[Giere, 1999] R. N. Giere. Science without Laws. Chicago and London: The University of Chicago Press, 1999.

[Giere, 2002] R. N. Giere. Scientific Cognition as Distributed Cognition. In Peter Carruthers, S. Stich and M. Siegal (eds.), Cognitive Bases of Science. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

[Giere, 2004] R. N. Giere. How Models Are Used to Represent Reality, Philosophy of Science (Symposia) 71: 742-752, 2004.

[Glassner, 2000] Jean-Jacques Glassner, ´Ecrire á Sumer: L'Invention du Cuneiforme, Seuil, 2000.

[Godfrey-Smith, 2006] P. Godfrey-Smith. The Strategy of Model-Based Science, Biology and Philosophy 21: 725-740.

[Goodman, 1972] N. Goodman. Problems and Projects. Bobbs-Merrill, 1972.

[Glare, 1982] P. G. W. Glare (ed.), Oxford Latin Dictionary, Clarendon Press, 1982.

[Gruchy, 1944] Allan G. Gruchy, 'Facts and reality in the social sciences', Ethics 54, 216–222, 1944.

[Gruzewska, 1954] H. M. Gruzewska. L'arithmétique des variables aléatories (The arithmetic of random variables). Cahiers Rhodaniens, 6, 9—56, 1954. [Hausdorff, 1923] F. Hausdorff. Moment probleme füreinendliches Intervall (Moment problem for a finite interval). Mathematische Zeitschrift, 16, 220—248, 1923.

[Hacker, 1968] B. C. Hacker. Greek catapults and catapult technology: Science, technology, and war in the ancient world. Technology and Culture, 9(1):34–50, Jan 1968.

[Hacking, 1983] I. Hacking. Representing and Intervening. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

[Hawking, 2002] Stephen Hawking (ed.), On the Shoulders of Giants: The Great Works of Physics and Astronomy, Running Press, 2002.

[Hempel, 1945] C. G. Hempel. Geometry and empirical science. American Mathematical Monthly, 52:7–17, 1945. Reprinted in Readings in Philosophical Analysis, ed. H. Feigl and W. Sellars (New York: Appleton-Century-Crofts, 1949). The World of Mathematics, vol. III, ed. James R. Newman (New York: Simon and Shuster, 1956).

[Hempel, 1948] C. Hempel. Studies in the Logic of Explanation. Philosophy of Science,15, 1 135-175, 1948.

[Hempel, 1965] C. Hempel. Studies in the Logic of Functional Explanation. In Aspects of Scientific Explanation and other essays in the philosophy of science. New York: Wiley, 1965.

[Hesse, 1963] Mary Brenda Hesse, Models and Analogies in Science. Sheed and Ward, 1963.

[Hesse, 1967] M. Hesse. Models and analogy in science. In The Encyclopedia of Philosophy, volume 5, pages 354–359. MacMillan, New York, 1967.

[Hoare, 1989] C. A. R. Hoare. Proof of a program: Find. In Essays in Computing Science, C.B. Jones ed., pp. 59–74. Prentice Hall, New York, 1989.

[Hooke, 1665] Robert Hooke, Micrographia. London, 1665.

[Hodges, 1993] W. Hodges. Logical features of Horn clauses. In Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming, Vol. I: Logical Foundations, D.M. Gabbay, C.J. Hogger and J.A. Robinson eds., pp. 449–503. Clarendon Press, Oxford, 1993.

[Hodges, 1997] W. Hodges. A Shorter Model Theory. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

[Hodges, 2001] W. Hodges. Articles 'Model theory', 'First-order model theory' and 'Tarski's truth definition'. Stanford Encyclopedia of Philosophy. plato.stanford.edu, 2001.

[Hottel, 1961] H. C. Hottel. Fire Modeling. In The Use of Models in Fire Research, Publication 786, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D. C., 1961.

[Hughes, 1983] T. Hughes. Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1983.

[Hughes, 1993] S. A. Hughes. Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. World Scientific, 1993.

[Humphreys, 2004] P. Humphreys. Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism and Scientific Method, Oxford: Oxford University Press, 2004.

[Hydra, date unknown] Hydra. Hydra multi-axis vibration test facility. http://www.esa.int/techresources/.

[Iverson and Falmagne, 1985] G. Iverson and J. C. Falmagne. Statistical issues in measurement. Mathematical Social Sciences, 10, 131—153, 1985.

[Johnson-Laird and Byrne, 1991] Philip N. Johnson-Laird and Ruth M. J. Byrne, Deduction, Lawrence Erlbaum, 1991.

[Johnson-Laird, 1983] Philip N. Johnson-Laird, Mental Models. Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness. Cambridge University Press, 1983.

[Justi, 1764] Johann Heinrich Gottlob von Justi, Von der wahren Macht der Staaten. In Gesammlete Politische und Finanzschriften u¨ber wichtige Gegenstnde der Staatskunst, der Kriegswissenschaften und des Cameral- und Finanzwesens. vol. 3, pp.40–106. Rothen 1764. Facsimile-reprint Scientia Verlag, 1970.

[Kamareddine et al., 2004] F. Kamareddine, T. Laan, and R. Nederpelt. A Modern Perspective on Type Theory. Kluwer, Dordrecht, 2004.

[Kisch, 1965] B. Kisch. Scales and Weights. New Haven, Connecticut: Yale University Press, 1965.

[Kitcher and Salmon, 1989] P. Kitcher and W. C. Salmon, eds. Scientific Explanation, University of Minnesota Press, 1989.

[Kleer and Brown, 1981] J. de Kleer and J. S. Brown, 'Mental models of physical mechanisms and their acquisition'. In Cognitive Skills and their Acquisition, J. Anderson ed., pp. 285–302, Lawrence Erlbaum, 1981.

[Klein, 1999] Ursula Klein, Techniques of modelling and paper-tools in classical chemistry. In [Morgan and Morrison, 1999, pp. 146-167], 1999.

[Klein, 2003] Ursula Klein, Experiments, Models, Paper Tools. Cultures or Organic Chemistry in the Nineteenth Century. Stanford University Press, 2003. [Knauff, 2007] Markus Knauff, 'How our brains reason logically', Topoi 26, 19–36, 2007.

[Koopman, 1940a] B. O. Koopman. The axioms and algebra of intuitive probability. Annals of Mathematics 41(2): 269—292, 1940.

[Koopman, 1940b] B. O. Koopman. The bases of probability. Bulletin of the American Mathematical Society 46: 763—774, 1940.

[Krantz et al., 1971] D. H. Krantz, R. D. Luce, P. Suppes, and A. Tversky. Foundations of Measurement, Vol. I: Additive and Polynomial Representations. New York: Academic Press, 1971. [Luce, 1956] R. D. Luce. Semi orders and a theory of utility discrimination. Econometrical, 24, 178—191, 1956.

[Krantz et al., 1971/2007] D. H. Krantz et al. Foundations of Measurement, Vol. I Additive and Polynomial Representations. Academic Press, 1971. Republished by Dover Publications, 2007.

[Kroes, 1989] P. Kroes. Structural Analogies between Physical Systems. British Journal for the Philosophy of Science 40, 145-154, 1989.

[Kroes, 1995] P. Kroes. Technology as Science-Based Heuristics. In J.C. Pitt (ed.): New Directions in the Philosophy of Technology.". Kluwer Academic Publishers: 17-39, 1995.

[Kroes, 1998] P. Kroes. Technological Explanations: The relation between structure and function of technological objects. Society for Philosophy and Technology, Vol. 3, http:scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v3n3/KROES.html, 1998.

[Kroes, 2001] P. Kroes. Technical Functions as Dispositions: A Critical Assessment. Techné, Journal of the Society for Philosophy and Technology, Vol. 5, http:scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v5n3/KROES.html, 2001.

[Knuuttila, 2005] T. Knuuttila. Models, Representation, and Mediation, Philosophy of Science 72: 1260-1271, 2005.

[Knuuttila and Merz, forthcoming] T. Knuuttila and M. Merz. An Objectual Approach to Scientific Understanding: The Case of Models. In H. de Regt, S. Leonelli and K. Eigner, eds., Scientific Understanding: Philosophical Perspectives. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, forthcoming.

[Knuuttila and Voutilainen, 2003] T. Knuuttila and A. Voutilainen. A Parser as an Epistemic Artefact: A Material View on Models, Philosophy of Science 70: 1484–1495, 2003.

[Kuipers, 2001] T. A. F. Kuipers, Structures in Science: Heuristic Patterns Based on Cognitive Structures, Kluwer 2001.

[Kuipers, 2001] T. A. F. Kuipers. Structures in Science: Heuristic Patterns Based on Cognitive Structures. Kluwer, Dordrecht, 2001.

[Landes, 1968] David S. Landes, The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present, Cambridge University Press, 1968.

[Lange, forthcoming] M. Lange. Dimensional explanations, Noûs, forthcoming.

[Langhaar, 1951] H. L. Langhaar. Dimensional Analysis and Theory of Models. Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York, 1951. Edition 1980.

[Lodge, 1888] A. Lodge. The Multiplication and Division of Concrete Quantities, Nature 38: 281-283. 1888.

[Langhaar, 1967] Henry Louis Langhaar, Dimensional Analysis and Theory of Models. Wiley/ Chapman and Hall, 1951, 8th ed. 1967.

[Larkin et al., 1980] J. H. Larkin, J. McDermott, D. P. Simon and H. A. Simon, 'Models of competence in solving physics problems', Cognitive Science 4, 317–345, 1980.

[Larkin and Simon, 1987] J. Larkin and H. A. Simon. Why a Diagram is (Sometimes) Worth 10,000 Words, Cognitive Science, 11:65-99, 1987.

[Latham, 1965] R. E. Latham, Revised Medieval Latin Word-List from British and Irish Sources, Oxford University Press, 1965.

[Latham and Howlett, 2001] R. E. Latham and D. H. Howlett, Dictionary of Medieval Latin from British Sources. Fascicule VI, M, Oxford University Press, 2001.

[Le Corbusier, 1951] Le Corbusier, Le Modulor : Essai sur une Mesure Harmonique a` l'échelle Humaine Applicable Universellement a` l'Architecture et à la Mécanique, L'Architecture d'Aujourd'hui, 1951.

[Leibniz, 1903] Gottfried Wilhelm Leibniz, Opuscules et Fragments Inédits. Louis Couturat, ed., Olms, 1966. (Reprint of Paris 1903 edition).

[Levinthal, 1966] Cyrus Levinthal, ‘Molecular model-building by computer’, Scientific American 214 (6), 42–52, 1966. [Lewis, Short, 1879] Charlton T. Lewis, Charles Short, A Latin Dictionary, Clarendon Press, 1879.

[Lorenz, 1963] Edward N. Lorenz, ‘Deterministic non periodic flow’, Journal of the Atmospheric Sciences 20, 130–141, 1963.

[Lynch, 1990] M. Lynch. The Externalized Retina: Selection and Mathematization in the Visual Documentation of Objects in Life Sciences. In M. Lynch and S. Woolgar (eds.), Representation in Scientific Practice. Cambridge, MA: MIT Press, 153-186, 1990.

[Luce et al., 1971] R. D. Luce, P. Suppes, A. Tversky, and D. Krantz. Foundations of Measurements, Additive and Polynomial Representations, volume 1. Academic Press, New York, London, 1971.

[Luce et al., 1990] R. D. Luce, D. H. Krantz, P. Suppes, and A. Tversky. Foundations of Measurement, Vol. III: Representation, Axiomatization, and Invariance. New York: Academic Press, 1990.

[Luce, 1996] R. D. Luce. The ongoing dialog between empirical science and measurement theory. Journal of Mathematical Psychology, 40:78–98, 1996.

[Maxwell, 1890] J. C. Maxwell. Dimensions. In The Encyclopaedia Britannica: A Dictionary of Arts, Sciences, and General Literature, Ninth Edition, Volume VII. Henry G. Allen Company, Publishers, 1890. Pp. 240-242.

[Malcolm, 1960] Donald G. Malcolm, ‘Bibliography on the use of simulation in management analysis’, Operations Research 8 (2), 169–177, 1960.

[Martini, 1967] Francesco di Giorgio Martini, Trattati di Architettura Ingegneria e Arte Militare. A cura di Corrado Maltese. Trascrizione di Livia Maltese Degrassi. 2 vols. Poliofilo, 1967.

[McKirahan, 1994] R. McKirahan. Philosophy Before Socrates: An Introduction with Texts and Commentaries. Hackett Publishing, 1994.

[Mehrtens, 2004] Herbert Mehrtens, Mathematical Models. In Models: The Third Dimension of Science, Soraya de Chadarevian and Nick Hopwood (eds.), pp.276–306, Stanford University Press 2004.

[Meinel, 2004] Christoph Meinel, Molecules and Croquet Balls. In Models. The Third Dimension of Science, Soraya de Chadarevian and Nick Hopwood, eds., pp.242-275, Stanford University Press, 2004.

[Mischke, 1968] Charles Russell Mischke, An Introduction to Computer-Aided Design. Fundamentals of engineering design. Prentice-Hall, 1968.

Morgan M. S. and Morrison, M. 1999. Models as Mediators. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

[Morgan and Morrison, 1999] Mary S. Morgan and Margaret Morrison (eds.), Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science. Cambridge University Press, 1999.

[Mostowski, 1952] Andrzej Mostowski, 'On models of axiomatic systems', Fundamenta Mathematicae 39, 133–158, 1952.

[Müller,1983] Roland Mu¨ller. Zur Geschichte des Modelldenkens und des Modellbegriffs. In Modelle - Konstruktion der Wirklichkeit, Herbert Stachowiak, ed., pp.17-86, Fink, 1983.

[Müller,1997] Roland Müller. Innovatives Lernen am Modell. In Innovation gewinnt. Kulturgeschichte und Erfolgsrezepte, Roland Müller, ed., pp.127–137, Industrielle Organisation/Orell Füssli, 1997.

[Müller,2000] Roland Mu¨ller. The Concept of Model and its Triple History. In Scientific Models. Their Historical and Philosophical Relevance, Erwin Neuenschwander, ed., pp.7-19. Univer- sita¨tZ¨urich, Geschichte der Naturwissenschaften, 2000.

[Müller,2004] Roland Müller. Model. The history of the concept and of its use in science. In Yearbook of the Artificial, Vol. 2. Models in Contemporary Sciences, Massimo Negrotti, ed., pp.239-262, Lang, 2004.

[Müller,2008] Roland Müller: Mueller Science, www.htmmuellerscience.com/ENGLISH/model.htm. [Nash, 2002] John Nash, The Essential John Nash, Harold W. Kuhn and Sylvia Nasar, eds., Princeton University Press 2002.

[Morrison, 1999] M. Morrison, M. Models as autonomous agents In Models as Mediators, M. Morrison and M.S. Morgan, eds., pp. 38–65. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

[Morrison, 1999] M. Morrison. Models as Autonomous Agents, in Mary S. Morgan and Margaret Morrison (eds.), Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science. Cambridge: Cambridge University Press, 38-65, 1999.

[Morrison and Morgan, 1999] M. Morrison and M.S. Morgan. Models as Mediating Instruments. In Mary S. Morgan and Margaret Morrison (eds.), Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science. Cambridge: Cambridge University Press, 10-37, 1999.

[Morgan and Morrison, 1999] M. S. Morgan and M. Morrison. Models as Mediators. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

[Narens, 2002] L. Narens. Theories of meaningfulness. Scientific Psychology Series. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, New Jersey, 2002. Dimensional analysis: Sections 1.5, 5.10.

[Narens, 2007] L. Narens. Introduction to the Theories of Measurement and Meaningfulness and the Use of Symmetry in Science. Scientific Psychology Series. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, New Jersey, London, 2007.

[Navier, 1822] C. L. M. H. Navier. Mémoire sur les lois du mouvement des fluides. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 2(6):389–440, 1822.

[Nersessian, 2008] N. J. Nersessian. Creating Scientific Concepts, Cambridge, MA: MIT Press, 2008.

[Nersessian, 1992] N. J. Nersessian. "How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science." In Minnesota Studies in the Philosophy of Science, edited by R. Giere, 3-45. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1992.

[Nersessian, 2002] N. J. Nersessian. "The Cognitive Basis of Model-Based Reasoning in Science." In The Cognitive Basis of Science, edited by P. Carruthers, S. Stich and M. Siegal, 133-53. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

[Nersessian, 2005] N. J. Nersessian. "Interpreting Scientific and Engineering Practices: Integrating the Cognitive, Social, and Cultural Dimensions." In Scientific and Technological Thinking, edited by M. Gorman, R. D. Tweney, D. Gooding and A. Kincannon, 17-56. Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum, 2005.

[Nersessian, 2008] N. J. Nersessian. Creating Scientific Concepts. Cambridge, MA: MIT Press, 2008.

[Nersessian, 1984] NancyJ. Nersessian, Faraday to Einstein. Constructing Meaning in Scientific Theories. Nijhoff/Kluwer, 1984.

[Nersessian, 2002] Nancy J. Nersessian, 'The cognitive basis of model-based reasoning in science'. In The Cognitive Basis of Science, Peter Carruthers, Stephen Stich and Michael Siegal, eds., pp. 133–153, Cambridge University Press 2002.

[Newell and Simon, 1976] Allen Newell and Herbert Alexander Simon, 'Computer science as empirical inquiry: symbols and search', Communications of the ACM 19, 113–126, 1976.

[Niiniluoto, 1999] Ilkka Niiniluoto, Critical Scientific Realism, Oxford University Press 1999.

[Norman, 1983] Donald A. Norman, 'Some observations on mental models', in [Gentner and Stevens, 1983] pp. 7–14.

[Niiniluoto, 1999] I. Niiniluoto. Critical Scientific Realism. Oxford University Press, Oxford, 1999.

[Neményi, 1975] P. F. Neményi. The main concepts and ideas of fluid dynamics in their historical development. Archive for History of Exact Sciences, 2(1):52–86, January 1975.

[Nersessian and Patton, this volume] N. Nersessian and C. Patton. Model-based reasoning in interdisciplinary engineering: Cases from biomedical engineering research laboratories, this volume.

[Newton, 1687] I. Newton. Philosophiae Naturalis Principia Mathematica. S. Pepys, Reg. Soc. Praeses, London, Juli 1687. Mathematical principles of natural philosophy, translated by Andrew Motte and revised by Florian Cajori. Volume 34 of Great Books of the Western World, Encyclopedia Britannica, 1934. [Palacios, 1964] J. Palacios. Dimensional analysis. MacMillan & Co Ltd, 1964.

[Oberauer, 2006] K. Oberauer. Reasoning with conditionals: A test of formal models of four theories. Cognitive Psychology, 53, 238–283, 2006.

[Olschki, 1918] Leonardo Olschki, Geschichte der neusprachlichen wissenschaftlichen Literatur. 1. Bd.: Die Literatur der Technik und der angewandten Wissenschaften vom Mittelalter bis zur Renaissance. Winter 1918.

[Pacioli, 1994] Luca Pacioli, Summa de Arithmetica, Geometria, Proportioni, et Proportion-alita, Balassi Kiad´o, 1994

[Pacioli, 1956] Luca Pacioli, De Divina Proportione, Fontes Ambrosiani, 1956.

[Palacios, 1964] J. Palacios. Dimensional Analysis. (Translated from the Spanish by P. Lee and L. Roth), Macmillan, 1964.

[Pankhurst, 1964] R. C. Pankhurst. Dimensional Analysis and Scale Factors. Butler and Tanner, 1964.

[Pascal, 1963] B. Pascal. De l'esprit géométrique, pp. 348–355. Seuil, Paris, 1963.

[Payne, 1936] M. P. Payne. Historical note on the derivation of Froude's skin friction constants. Transactions of the Institution of Naval Architects, 78:93–109, 1936.

[Peacock, 1834] George Peacock, 'Report on the recent progress and present state of certain branches of analysis'. In Report of the Third Meeting of the British Association for the Advancement of Science, John Murray, pp. 185–352, 1834.

[Pervushin et al., 2004] V. Pervushin, V. Zinchuk, and A. Zorin. Conformal relativity: Theory and observations, 2004.

[Piaget, 1929] Jean Piaget, The Child's Conception of the World, Kegan Paul/ Harcourt Brace 1929.

[Piaget, 1930] Jean Piaget, The Child's Conception of Physical Causality, Kegan Paul, 1930. [Plato, 1971] Plato, Timaeus and Critias, translated and edited by Desmond Lee, Penguin, 1971.

[Pitt, 1988] J. C. Pitt. Theories of Explanation, New York: Oxford University Press, 1988.

[Pitt, 2000] J. C. Pitt. Thinking About Technology, (Originally published by Seven Bridges Press, New York), now at www.phil.vt.edu/HTML/people/pittjoseph.htm, 2000.

[Pokorny, 1949]] Julius Pokorny. Indogermanisches Etymologisches Wo¨rterbuch, 11 th edition, Bern: A. Francke, 1948–1969.

[Polk and Seifert, 2002] Thad A. Polk and Colleen M. Seifert, Cognitive Modeling, MIT Press, 2002.

[Popper, 1935] Karl Popper, Logik der Forschung, Springer, 1935.

[Portides, 2005] D. P. Portides. Scientific Models and the Semantic View of Scientific Theories, Philosophy of Science 72: 1287-1298, 2005.

[Prudhomme et al., 2003] G. Prudhomme, G. P. Zwolinski, and D. Brissaud. Integrating into the design process the needs of those involved in the product life-cycle. Journal of Engineering Design, 14, 333–353, 2003.

[Quarton, 1998] D. C. Quarton. The evolution of wind turbine design analysis—A twenty year progress review. Wind Energy, 1, 5–24, 1998. [Ramsey, 1978] F. Ramsey. Foundations: Essays in Philosophy, Logic, Mathematics and Economics, D.H. Mellor ed. Routledge and Kegan Paul, London, 1978.

[Rayleigh, 1915] Lord Rayleigh, 'The principle of similitude', Nature 95, 66–68, 1915.

[Reynolds, 1883] Osborne Reynolds. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. Philosophical Transactions of the Royal Society, March 1883. Reprinted in: Papers on Mechanical and Physical Subjects. Cambridge University Press, vol. 2, pp. 51ff., 1901.

[Reech, 1852] F. Reech. Cours de Mécanique d'après la Nature Généralement Flexible et Élastique des Corps. Carillian-Goeury et Von Dalmont, Paris, 1852.

[Renda et al., 2004] V. Renda, A. Murphy, and P. Sollogoub. Experimental facilities for earthquake engineering simulation worldwide. Technical Report 10, NEA/CSNI/R, 2004. [Rouse and Ince, 1957] H. Rouse and S. Ince. History of hydraulics. Iowa Institute of Hydraulic Research State University of Iowa, 1957.

[Rogers Commission, 1986] Rogers Commission report, Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident, 1986.

[Saalman, 1980] Howard Saalman, Filippo Brunelleschi. The Cupola of Santa Maria del Fiore. Zwimmer, 1980.

[Scholderer, 1963] Victor Scholderer, Johann Gutenberg, Inventor of Printing, British Museum, 1963.

[Schierbeek, 1959] A. Schierbeek, Measuring the Invisible World: The Life and Works of Antoni van Leeuwenhoek FRS, Abelard-Shuman, 1959.

[Sedov, 1959] L. I. Sedov. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. Academic Press, 1959.

[Shepard and Metzler, 1971] Roger Newland Shepard and Jacqueline Metzler, 'Mental rotation of three-dimensional objects', Science 171, 701–703, 1971.

[Shew, 2007] A. Shew. Beaver Dams, Spider Webs, and the Sticky Wicket: An Investigation into What Counts as Technology and What Counts as Knowledge. MS Thesis, Science and Technology Studies Graduate Program, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.

[Shipley, 1984] J. T. Shipley. The Origins of English Words: A Discursive Dictionary of IndoEuropean Roots. Johns Hopkins University Press, 1984.

Stachowiak H.. Allgemeine Modelltheorie. Springer, Wien, 1973

[Stenning, 2002] Keith Stenning, Seeing Reason: Image and Language in Learning to Think, Oxford University Press, 2002.

[Sturtevant, 1612] Simon Sturtevant, Metallica: or the Treatise of Metallica. Briefly comprehending the doctrine of diverse new metallical inventions. Eld, 1612.

[Sørensen and Kock, 1995] J. N. Sørensen and C. W. Kock. A model for unsteady rotor aerodynamics. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 58, 259–275, 1995.

[Stenning, 2002] K. Stenning. Seeing Reason: Image and Language in Learning to Think. Oxford University Press, Oxford, 2002.

[Sterrett, 2002] S. G. Sterrett. Physical models and fundamental laws: Using one piece of the world to tell about another. Mind & Society, 3(5):51–66, 2002.

[Sterrett, 2006] S. G. Sterrett. Models of machines and models of phenomena. International Studies in the Philosophy of Science, 20(1):69–80, March 2006.

[Stokes, 1845] G. G. Stokes. On the theories of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solides. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 8:287–319, 1845.

[Slokarnik, 2006] M. Slokarnik. Scale-Up in Chemical Engineering. Wiley, 2006.

[Sterrett, 2006] S. G. Sterrett. Models of Machines and Models of Phenomena, International Studies in Philosophy of Science. Vol. 20 2006, p. 69-80.

[Sterrett, 2005] S. G. Sterrett. Wittgenstein Flies A Kite: A Story of Models of Wings and Models of the World. Pi Press (Penguin Books), 2005.

[Sterrett, 2002] S. G. Sterrett. Physical Models and Fundamental Laws: Using One Piece of the World to Tell About Another, Mind and Society, Vol. 3, March 2002, p. 51-66.

[Scott and Suppes, 1958] D. Scott and P. Suppes. Foundational aspects of theories of measurement. Journal of Symbolic Logic, 23, 113—128, 1958.

[Shohat and Tamarkin, 1943] J. A. Shohat and J. D. Tamarkin. The Problem of Moments. New York: American Mathematical Society, 1943.

[Suarez,1999] M. Suarez. Theories, Models, and Representations. In L. Magnani, N. J. Nersessian and P. Thagard (eds.), Model-Based Reasoning in Scientific Discovery. New York: Kluwer, 75-83, 1999.

[Suárez,2003] M. Suárez. Scientific Representation: Against Similarity and Isomorphism, International Studies in the Philosophy of Science 17: 225-244, 2003.

[Suárez, 2004] M. Suárez. An Inferential Conception of Scientific Representation, Philosophy of Science (Symposia) 71: 767-779, 2004.

[Suppe, 1977] F. Suppe. The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism. University of Illinois Press, Illinois Urbana, 1977.

[Suppe, 1974] F. Suppe. The Structure of Scientific Theories. Urbana, University of Illinois Press, 1974.

[Suppe, 1989] F. Suppe. The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism. Urbana and Chicago, University of Illinois Press, 1989.

[Suppes, 1960] Patrick Suppes, 'A comparison of the meaning and uses of models in mathematics and the empirical sciences', Synthese 12 287–301, 1960.

[Suppes and Zinnes, 1963] P. Suppes and J. L. Zinnes. Basic measurement theory. In Handbook of Mathematical Psychology, Vol. 1, R.D. Luce, R.R. Bush and E.H. Galanter, eds., New York: Wiley, pp. 3—76, 1963.

[Suppes, 1969] P. Suppes. Studies in the Methodology and Foundations of Science: Selected Papers from 1951 to 1969 (pp. 4—8). Dordrecht: Reidel, 1969.

[Suppes, 1974] P. Suppes. The measurement of belief. Journal of the Royal Statistical Society (Series B), 36, 160—191, 1974.

[Suppes and Zanotti, 1977] P. Suppes and M. Zanotti. On using random relations to generate upper and lower probabilities. Synthese, 36, 427—440, 1977.

[Suppes et al., 1989] P. Suppes, D. H. Krantz, R. D. Luce, and A. Tversky. Foundations of Measurement, Vol. II: Geometrical, Threshold and Probabilistic Representations. New York: Academic Press, 1989.

[Suppes and Zanotti, 1992] P. Suppes and M. Zanotti. Qualitative axioms for random-variable representation of extensive quantities. In Philosophical and Foundational Issues in Measurement Theory, C.W. Savage and P. Ehrlich, eds., pp. 39—52. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1992.

[Suppes, 2002] P. Suppes. Representation and Invariance of Scientific Structures. CSLI, Stanford CA, 2002.

[Suppes, 2006] P. Suppes. Transitive indistinguishability and approximate measurement with standard finite ratio-scale representations. Journal of Mathematical Psychology, 50, 329— 336, 2006.

[Szucs, 1980] E. Szucs. Similitude and Modeling. Fundamental studies in engineering. Elsevier, Amsterdam, 1980.

[Tarski, 1954] Alfred Tarski, Contributions to the theory of models. Indagationes Mathematicae 16, 572–588, 1954; 17, 56–64, 1955.

[Tarski, 1954] A. Tarski. Contributions to the theory of models I. Indagationes Mathematicae, 16, 572–581, 1954.

[Tarski, 1983] A. Tarski. The concept of truth in formalized languages. In Logic, Semantics, Metamathematics, J. Corcoran ed., pp. 152–278. Hackett, Indianapolis, Indiana, 1983.

[Taylor, 1997] J. R. Taylor. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements. University Science Books, Dulles Virginia, 1997.

[Taylor and Thompson, 2008] B. N. Taylor and A. Thompson, eds. The International System of Units (SI). NIST Special Publication 330, 2008 Edition. (United States version of the English text of the eighth edition (2006) of the International Bureau of Weights and Measures publication Le Système International d' Unitès (SI)). National Institute of Standards and Technology. Issued March 2008. http://physics.nist.gov/Pubs/SP330/sp330.pdf downloaded June 23, 2008.

[Tertullianus, 2004] Quintus Septimius Florens Tertullianus, Ad Nationes, Kessinger, 2004.

[Teller, 2001] P. Teller. Twilight of the Perfect Model Model, Erkenntnis 55: 393-415, 2001.

[Thomson, 1890] William Thomson, Gesammelte Abhandlungen zur Lehre von der Elektricität und dem Magnetismus (Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism). German translation by L. Levy and B. Weinstein. Springer, 1890 (engl. 1872, 2. ed. 1884). [Tolman, 1932] Edward Chace Tolman, Purposive Behavior in Animals and Man, Century, 1932.

[Toulmin, 1953] Stephen Toulmin, The Philosophy of Science, Harper and Row, 1953. [Van Leeuwen et al., 1946] C. H. W. Van Leeuwen, B. Schilder and D. Veltman, Entdecker und Entdeckungen. Bu¨chergilde Gutenberg, 1946 (holl. 1941). [Vitruvius, 2004] Marcus Vitruvius Pollio, De Architectura Libri Decem, Matrix Verlag 2004.

[Towhata et al., 2004] I. Towhata, S. K. Prasad, G. P. Chandradhara, and P. Nanjundaswamy. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering. Current Science, 87(10):1398– 1404, November 2004.

[Thurstone, 1927a] L. L. Thurstone. A law of comparative judgment. Psychological Review, 34, 273—286, 1927.

[Thurstone, 1927b] L. L. Thurstone. Psychophysical analysis. American Journal of Psychology, 38, 368—389, 1927.

[Truesdell, 1953] C. Truesdell. Notes on the history of the general equations of hydrodynamics. The American Mathematical Monthly, 60:445–458, 1953.

[Von Schlözer, 1793] August Ludwig von Schl¨ozer. Allgemeines Stats Recht und Stats Verfassungs Lehre. Vandenhoeck & Ruprecht, 1793. (reprint Keip, 1970).

[Vonessen, 1989] Franz Vonessen, Herz-Sonne-Symbolik bei Kepler und Harvey. Zur Geistesgeschichte der Naturwissenschaft. Frankenbach, 1989.

[Von Wartburg, 1966] Walther Von Wartburg, Französisches Etymologisches Wörterbuch 1922– 1967 (keyword: modulus, 1966, 15–19)

[Van Fraassen, 1990] B. Van Fraassen. The Scientific Image. Clarendon Press, Oxford, 1990.

[Van Kuik, 2003] G. A. M. Van Kuik. An inconsistency in the actuator disc momentum theory. Wind Energy, 7, 9–19, 2003.

[Vincent and Brown, 2005] T. L. Vincent and J. S. Brown. Evolutionary Game Theory, Natural Selection, and Darwinian Dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

[Van Fraassen, 1980] B. Van Fraassen. The Scientific Image. Oxford: Oxford University Press, 1980.

[Vincenti, 1990] W. Vincenti. What Engineers Know And How They Know It: Analytical Studies From Aeronautical History. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1990.

[Vaschy, 1892] A. Vaschy. Sur les lois de similitude en physique. Annales Télégraphiques, 1892. Pp. 25-28.

[Vaughan, 1996] D. Vaughan. The Challenger Launch Decision: Risky Technology, Culture and Deviance at NASA. Chicago: University of Chicago Press, 1996.

[Vincenti, 1990] W. Vincenti. What Engineers Know and How they Know it: Analytical Studies from Aeronautical History. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990.

[Walley, 1991] P. Walley. Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities. London: Chapman and Hall, 1991.

[Watkins, 2000] Calvert Watkins, The American Heritage Dictionary of Indo-European Roots, Houghton Mifflin, 2000.

[Weber, 1930] Moritz Weber, Das Allgemeine Ähnlichkeitsprinzip der Physik und sein Zusammenhang mit der Dimensionslehre und der Modellwissenschaft. Jhrb. Schiffbautechn. Ges. 31, 274–354, 1930.

[Weisberg, 2007] M. Weisberg. Who is a Modeler, British Journal for the Philosophy of Science 58: 207-233, 2007.

[Wittgenstein, 1953] Ludwig Wittgenstein, Philosophical Investigations. Blackwell, 1953.

[Wirth, 1971] Niklaus Wirth, Program development by stepwise refinement. Communications of the ACM, 14 (4), 221–227, 1971.

[Wizelius, 2007] T. Wizelius. Developing Wind Power Projects: Theory and Practice. Earth scan, London, 2007.

[Wright, 1992] T. Wright. Scale models, similitude and dimensions: Aspects of mid-nineteenth century engineering science. Annals of Science, 49:233–254, 1992.

[Wiener, 1921] N. Wiener. A new theory of measurement: A study in the logic of mathematics. Proceedings of the London Mathematical Society, 19, 181—205, 1921.

[Wimsatt, 1980] W. C. Wimsatt. Teleology and the Logical Structure of Function Statements. Studies in the History and Philosophy of Science, 3: 1-80, 1980.

[Wimsatt, 2002] W. C. Wimsatt. Functional Organization, Analogy, and Inference. In Ariew A. (ed.), Functions: New Essays in the Philosophy of Psychology and Biology, Oxford, New York: Oxford University Press, pp. 173-221, 2002.

[Winner, 1986] L. Winner. The Whale and the Reactor. Chicago: University of Chicago Press, 1986.

[Young and Veen, 2008] Indi Young and Jeff Veen, Mental Models: Aligning Design Strategy with Human Behavior, Rosenfeld, 2008.

Zalta Edward N. (ed.), http://plato.stanford. edu/entries/models-science/.

[Zhang, 1997] J. Zhang. The Nature of External Representations in Problem Solving, Cognitive Science 21(2): 179-217, 1997.

[Zwart, this volume] Sjoerd Zwart, ‘Scale modelling in engineering sciences’, this volume, part V.