

CONSTRUCCIÓN CON REGLA Y COMPÁS PARA CONFIGURAR UNA MÁQUINA DE FABRICAR ARCOS CON MADERA LAMINADA

Dr. Rafael Gerardo Páez
Universidad Central de Venezuela
arkitectoniko@gmail.com
Venezuela
[Orcid ID](#)

Recepción: 02 de enero del 2021. Aceptación: 15 de marzo del 2021.

Innovación tecnológica como proceso

Resumen

La construcción con regla y compás abarca procedimientos gráficos sin mediciones, ni escalas con instrumentos graduados; amerita, solamente, del compás para líneas curvas y reglas simples para las rectas. Entre sus aplicaciones está solucionar problemas de geometría intuitiva representando puntos, líneas, ángulos, círculos y óvalos. Es una técnica gráfica que, históricamente, ha servido para configurar algunas máquinas-herramientas innovadoras. Es útil, además, para concebir una máquina para prensar y unir con pegamentos pequeñas láminas de madera maciza y rectilínea; formando elementos estructurales curvos. Lo cual demanda un dominio tecnológico de los procesos industriales, bajo parámetros comparativos de contradicciones entre complejidad y sencillez. En esta investigación fue estudiado el diseño conceptual de una máquina para prensar y conformar arcos carpanteles, como componentes edificatorios, con madera laminada encolada. La metodología permitió analizar ordenamientos gráficos para conseguir puntos de tangencia comunes entre dos, tres y cuatro circunferencias; generándose, con el trazado de semióvalos, porciones de curvas con diferentes longitudes y curvaturas. Los resultados alcanzados plantean la concepción geométrica de una máquina sencilla, manual, para fabricar arcos carpanteles de tres centros, con segmentos curvos que facilitan las labores de fabricación del componente. En conclusión: el diseño geométrico de una máquina industrial básica; para fabricar arcos carpanteles, constituye una propuesta disruptiva sustentada en premisas determinadas por necesidades de un cambio tecnológico emergente. El artículo está incluido en la línea de Investigación: Innovación Tecnológica como Proceso; sublínea: Asimilación y Dominio Tecnológico, Postgrado: Gestión de Investigación y Desarrollo, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad Central de Venezuela.

Palabras clave: Arco carpantele; complejidad, construcción con regla y compás; geometría intuitiva; madera laminada; máquina manual; sencillez.



**BUILDING WITH A RULER AND A
 COMPASS TO DESIGN A MACHINE TO
 MAKE ARCHES WITH GLUED LAMINATED
 TIMBER**

**CONSTRUCTION AVEC RÈGLE ET
 COMPAS POUR LA CONCEPTION D'UNE
 MACHINE POUR RÉALISER DES ARCS
 AVEC DU BOIS LAMELLÉ-COLLÉ**

Abstract

Résumé

Building with a ruler and a compass includes graphic procedures without measurements or scales with graduated instruments; it only merits a compass for curved lines and a simple ruler for straight lines. One of its applications is to solve intuitive geometry problems representing points, lines, angles, circles, and ovals. This graphic technique has historically served to configure some innovative machine tools. Therefore, it is helpful to conceive a machine for pressing and gluing small solid and rectilinear wood sheets, generating curved structural elements. This demands a technological mastery of industrial processes under comparative parameters of contradictions between complexity and simplicity. In this research, the conceptual design of a machine for pressing and shaping carpal arches was studied, as building components, with glued laminated wood. The methodology allowed the author to analyze graphic arrangements to obtain common points of tangency between two, three, and

La construction avec règle et compas comprend des procédures graphiques sans mesures ni échelles avec instruments gradués ; elle ne nécessite qu'un compas pour les lignes courbes et des règles simples pour les lignes droites. Il permet notamment de résoudre des problèmes de géométrie intuitive en représentant des points, des lignes, des angles, des cercles et des ovales. Il s'agit d'une technique graphique qui, historiquement, a été utilisée pour configurer certaines machines-outils innovantes. Il est également utile de concevoir une machine permettant de presser et d'assembler avec de la colle de petites feuilles de bois massif et rectiligne, en formant des éléments structurels courbes. Ce qui exige une maîtrise technologique des processus industriels, sous des paramètres comparatifs de contradictions entre complexité et simplicité. Dans cette recherché, le design conceptual d'une machine a été étudié pour le pressage et le façonnage de beffrois arqués, en tant qu'éléments de construction, avec du

four circles. With the tracing of semi ovals, it generated portions of curves with different lengths and curvatures. The results achieved propose the geometric conception of a simple, manual machine to manufacture three-center basket handle arches with curved segments that facilitate component manufacturing tasks. In conclusion: the geometric design of a basic industrial machine to manufacture carpal arches constitutes a disruptive proposal based on premises determined by the needs of an emerging technological change. The article is part of the research line: Technological Innovation as a Process; subline: Assimilation and Technological Domain, Postgraduate in Research and Development Management, Faculty of Economic and Social Sciences, Central University of Venezuela.

Keywords: Basket-handle arch; complexity; building with a ruler and compass; glued laminated timber; simplicity.

bois lamellé-collé. La méthodologie a permis d'analyser des arrangements graphiques pour obtenir des points de tangence communs entre deux, trois et quatre circonférences ; en générant, avec le traçage de demi-ovales, des portions de courbes de différentes longueurs et courbures. Les résultats obtenus proposent la conception géométrique d'une machine simple et manuelle pour fabriquer des arcs en forme de cloche à trois centres, avec des segments courbes qui facilitent le travail de fabrication du composant. En conclusion : la conception géométrique d'une machine industrielle de base pour la fabrication d'arcs en forme de cloche est une proposition disruptive basée sur des prémisses déterminées par les besoins d'un changement technologique émergent. L'article est inclus dans la ligne de recherche : L'innovation technologique comme processus ; sous-ligne : Assimilation et domaine technologique, Postgraduate : Gestion de la recherche et du développement, Faculté des sciences économiques et sociales, Universidad Central de Venezuela.

Mots clés : arc Carpanel ; complexité, construction avec règle et compas ; géométrie intuitive ; bois stratifié ; machine manuelle ; simplicité.

Introducción

En el pasado el hombre conoció las máquinas simples: rueda, palanca, cuña, polea y tornillo; con ellas organizó sencillos sistemas mecánicos desarrollando así las máquinas compuestas. Las utilizaba, pero no siempre se difundían conocimientos de los fundamentos científicos que justificaran su funcionamiento.

La historia de la evolución tecnológica de la humanidad demuestra que el éxito en la innovación de una máquina para fabricar componentes estructurales curvos con madera laminada tiene como punto de partida una metodología acertada aplicada a la fase de diseño conceptual.

La falla en el prensado de los componentes estructurales de madera laminada implica, en muchos de los casos, la pérdida y el riesgo de colapso de una edificación. De allí la importancia de diseñar una máquina que pueda garantizar un proceso de prensado eficiente.

El objetivo general de esta investigación es proponer la configuración conceptual geométrica y gráfica de una máquina sencilla y manual para la fase de prensado de arcos carpaneles de tres centros con madera laminada de calidad estructural.

Como procedimiento se aplican conocimientos de construcción con regla y compás, una técnica de expresión gráfica que alcanzó auge en el período Helénico griego y que se ha empleado para configurar algunas máquinas-herramientas innovadoras; además, sirve de base para la solución de algunos problemas matemáticos. Esta técnica abarca representaciones sin ocupar instrumentos de dibujo graduados para mediciones, ni escalas; amerita, solamente, del compás para trazo de líneas curvas y reglas simples para las rectas. Una de sus aplicaciones consiste en solucionar problemas de geometría intuitiva representando puntos, líneas, ángulos, planos, círculos y óvalos.

El hombre creó las máquinas y éstas pasaron a modificar esencialmente la concepción del mundo; un mundo cada vez más industrializado y que, actualmente, es dominado por quienes controlen procesos de fabricación automatizados, sofisticados, con tecnología de punta para

obtener productos costosos y duraderos ocupando para ello la menor cantidad de tiempo con la participación de un mínimo de operarios.

Marco teórico

Venezuela, al iniciar el siglo XXI, disponía de “alrededor de 30 millones de hectáreas correspondientes a bosques altos y medios con potencialidad productiva” (Franco, 2003: 11); una cantidad que formaba parte de la ingente riqueza forestal distribuida en *Áreas Bajo Régimen de Administración Especial* (ABRAE). Para el año 2014, según cifras del Ministerio del poder Popular de Ecosocialismo, Hábitat y Vivienda (MPPEHV) existían en el país “400 ABRAE que abarcaban 67.9 millones de hectáreas, representando 74% del territorio nacional (MPPEHV, 2014); sin embargo, la superficie cubre aproximadamente 47% del territorio debido a la superposición de varias ABRAE” (FAO; 2020: 11).

Aún habiendo ese recurso, en el país no está instalada una planta industrial para procesar la madera de estos bosques y ocuparla en soluciones edificatorias con estructuras de madera laminada. Páez (2017) establece que “En Venezuela no hay ejemplos significativos de construcciones donde la madera laminada de calidad estructural se haya aplicado con los criterios que la caracterizan como una tecnología innovadora” (p. 109).

El modelo de máquina a seleccionar responde a los siguientes factores:

La geometría aplicada en su concepción. El mayor énfasis en el diseño de un prototipo debe estar en la geometría. Su veracidad es también válida si la solución propuesta se desarrolla con el uso de técnicas de construcción con regla y compás, para una idea geométrica intuitiva.

El capital. El costo de adquisición de soluciones tecnológicas en el medio de reconversión de maderas macizas a soluciones laminadas y encoladas es directamente proporcional al capital disponible. Adquirir máquinas potentes, con tecnología de última generación, requiere el desembolso de una mayor cantidad de dinero en comparación con la adquisición de otras, que sean rudimentarias y con menor grado de sofisticación.

Las dimensiones. Existen dos aspectos dimensionales en el proceso de producción de madera laminada estructural. Una es referida al tamaño del espacio donde será ubicada la maquinaria. El otro aspecto dimensional es el del componente a fabricar. Si son medianos o menores requerirán maquinarias industriales distintas a aquellas destinadas a producir elementos estructurales de grandes dimensiones (figura 1).

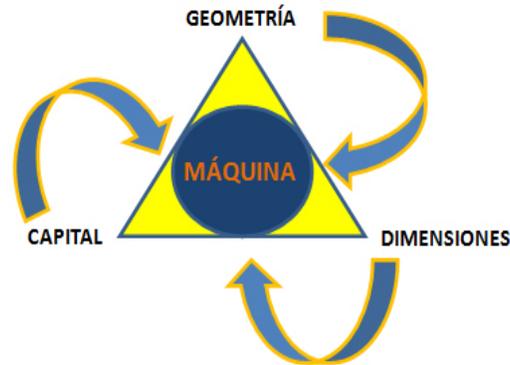


Figura 1. Factores que inciden en la selección del modelo de una máquina para fabricar arcos con madera laminada de calidad estructural.

Arco carpanel; una conceptualización necesaria

“Si la columna es arquitectura pura, el arco es ingeniería...

si la columna es arte el arco es técnica”

Torroja (1998: 101).

El arco carpanel, también llamado apainelado o zarpanel, comenzó a ser aplicado en procedimientos edificatorios con una somera función ornamental, aproximadamente, en el siglo XII.

La Edad Media sirvió de preámbulo para que el trazo de una curva de tres centros no alineados (que fue estudiada por los geómetras pitagóricos, en el período Helénico griego), se empleara en estructuras de arcadas, puentes, ventanas y accesos. Más tarde, en el Renacimiento (a partir del siglo XV) continuó su uso constructivo pero se vio opacado por otras aplicaciones más prácticas como lo fueron los arcos rebajados de un solo centro y arcos de semielipse.

Proponer su fabricación con madera maciza resultó muy laborioso; por lo tanto, los materiales pétreos con mampuestos de piedra o ladrillos, fueron los más comunes empleados en su fabricación.

El trazado gráfico de los arcos carpaneles tradicionalmente ha sido representado con técnicas de regla y compás. “En el arco carpanel, la clave para que la transición entre arcos correspondientes a circunferencias distintas sea adecuada reside en que las circunferencias lateral y central son [sic] tangentes entre sí en el punto de enlace” Abajo & Delgado, 2015: 19).

Descartes (1649) escribió el Libro Segundo de La Geometría titulado «De la naturaleza de las líneas curvas» allí analizó las propiedades geométricas de los óvalos entre las figuras que “se pueden construir dibujando solo líneas rectas y círculos” (p. 11); señalando, además, que son “curvas especiales que responden a consideraciones fijadas de las tangentes o normales” (González, 2003: 320).

Bermúdez (1993) define geoméricamente un arco carpanel como “El que tiene forma de elipse y se traza mediante varios arcos de circunferencia, cuyos centros son siempre en número impar” (p. 70). Saad (1985), coincide a su vez, cuando establece que “Los arcos carpaneles se trazan o forman con varias porciones de curvas circulares cuyos centros se fijan con exactitud. Pueden ser tres, cinco, siete o más centros...” (p. 75).

Sánchez (2011) presenta una variedad de métodos con regla y compás para trazo de arcos carpaneles, cinco de los cuales corresponden a la modalidad de tres centros (pp. 34 y ss).

Engel (2001) señala que “la geometría es un instrumento indispensable para dar forma al entorno material y espacial de los edificios y las estructuras” (p. 329). Es así que el uso de arcos carpaneles configurados como semióvalos justifica taxativamente lo mencionado por Páez (2017)

“El arco carpanel ha sido el que mejor se ha adaptado ante el reto de cubrir grandes luces sin apoyos intermedios, que rebasan los 100

metros o más de distancia entre los apoyos y con estructuras con madera laminada donde no se eleve exageradamente la flecha de los componentes estructurales; los arcos han evolucionado hacia una configuración de curvas de semióvalos.” (Páez, 2017: 116, 117).

Construcción con regla y compás y geometría intuitiva para la solución conceptual en el diseño de una máquina de prensar arcos con madera laminada

Después del dibujo a mano suelta los innovadores del pasado recurrieron a la construcción con regla y compás, una de las técnicas de expresión gráfica que permite resolver casos de representación de distintas entidades geométricas tales como puntos, rectas, ángulos, figuras curvas cerradas y abiertas y planos.

Morales (2007) fija que “la **construcción con regla y compás** consiste en la determinación de puntos, rectas (o segmentos de ellas) y circunferencia (o arcos de las mismas) a partir de una regla y un compás *ideales*.” Pero tal definición resulta difusa ya que hace a un lado la consideración y aplicación de procedimientos gráficos de dibujo sin utilizar mediciones con reglas graduadas ya que solo ameritan del compás para líneas curvas y reglas simples para las rectas.

Una de las aplicaciones fundamentales de la construcción con regla y compás consiste en la solución de problemas de geometría intuitiva. Fera, Espinoza y Martínez (2006) indican que “Percepción espacial y geometría intuitiva es el desarrollo del sentido espacial” por lo que es factible considerar la utilidad de esta técnica para la figuración conceptual del modelo operacional de una máquina para prensar arcos en taller, a fabricarse con madera laminada.

Antecedentes

Los antecedentes de esta investigación abarcan tres vertientes: la relacionada con la creación industrial de máquinas prístinas desarrolladas en el pasado con técnicas de dibujo libre o regla y compás; así como conceptos de geometría intuitiva o avanzados conceptos geométricos que marcaron el devenir histórico industrial de la humanidad. Se determina también,

a su vez, el estado del arte de las máquinas industrializadas y sofisticadas para prensar arcos con madera laminada y se enumeran los antecedentes de la investigación en el campo de las actividades de investigación – desarrollo- innovación e invención (I+D+i).

Antecedentes de aplicaciones de la geometría intuitiva y construcción con regla y compás en la invención de máquinas

En la antigüedad se inició el estudio y diseño de máquinas con dispositivos manuales –no podían ser de otro modo- que desarrollaran algún tipo de trabajo mecánico. Estos alcances significaron logros importantes en el diseño industrial y el campo de la invención de máquinas.

Se describirán a continuación algunos aportes de dos innovadores que desarrollaron propuestas de máquinas; que aun, en la actualidad, tienen vigencia en procedimientos industriales contemporáneos mediante la evolución a modernos sistemas de funcionamiento:

Arquímedes las máquinas sencillas cobran auge en el Clásico griego

Arquímedes de Siracusa (287-212 a de C) resolvió un claro ejemplo de la combinación de máquinas simples y conceptos geométricos novedosos; el *Tornillo de Arquímedes*, en cuanto al diseño, conjugaba distintas máquinas simples en una sola: el plano inclinado y el tornillo combinados en una conceptualización geométrica muy avanzada tal como era el helicoides alabeado, girando en un cilindro. Fue ideado para extraer agua de los ríos; lagos y mares. Este reunía, entre otras, las siguientes condiciones: fácil de manipular, bajo peso, su transporte de un lugar a otro no era complicado ni costoso; aportaba un importante beneficio en la solución a un problema vigente que para la época; no había sido resuelto; fue fabricada con materiales duraderos.

Leonardo Da Vinci el artífice del Renacimiento

En un ambiente de privación de conocimientos por el oscurantismo Leonardo Da Vinci (1452-1519) realizó inventos de diversas máquinas terrestres, subacuáticas y voladoras, destacando algunas muy sencillas tales como el parapente que navegaba con la fuerza del aire; hasta un modelo primigenio de helicóptero que empleaba un sistema helicoidal propulsado



manualmente el cual constituye uno de los más importantes aportes debido al nivel de conocimiento demostrado en relación a efectos de fuerzas aplicadas por engranajes y estudios del movimiento. Estas ideas progresaron hasta alcanzar los sistemas actuales de helicópteros, que mediante los efectos de rotación de hélices planas son mantenidos en el aire.

Estado del arte de las máquinas para prensar arcos con madera laminada

El producto final del presente artículo consiste en una propuesta geométrica, conceptual y gráfica de una máquina para prensar arcos carpanteles con madera laminada de calidad estructural, enfrentándose esta propuesta a una dicotomía entre procesos industrializados antagónicos que surgen en el campo de las innovaciones tecnológicas y que se resuelven por medio de las invenciones de nuevas maquinarias: la sencillez vs. la complejidad.

En las innovaciones tecnológicas para el desarrollo experimental de nuevos prototipos de máquinas para fabricar arcos con madera laminada encolada se demuestra que estas han evolucionado a equipos industriales que responden a exigencias de producción cada vez mayores revelándose una tendencia a la complejidad.

Las máquinas empleadas en la industria de fabricación de componentes con madera laminada para solucionar sistemas estructurales en procesos constructivos poseen un origen que tiene como punto de partida la sencillez, basada en el uso de las máquinas-herramientas, manuales y básicas con las que se realizan trabajos artesanales de carpintería.

Una máquina cepilladora, al igual que una canteadora realiza un trabajo de acabado, en taller, cuyo resultado es similar al que en esencia se logra con una garlopa o cepillo de carpintero (Wood Choice, 2019).

Los taladros de última generación, son el más claro ejemplo de lo que se ha alcanzado con los avances de máquinas en estos procesos industriales. Su herramienta manual más remota es el berbiquí.

En lo que se refiere a los procedimientos de prensado y reprensado el origen de la técnica es difuso. Remotamente se emplearon torniquetes con mecates de sisal que entorchados se

apretaban para que distintas piezas, una vez encoladas, se unieran. Luego se perforaron las piezas a unir y se hincaron tarugos de madera, que, cual cuña, permitían apretarlas entre sí. Hasta el surgimiento de los sargentos de carpintería como prensas manuales.

La evolución tecnológica industrial jamás se detiene en su avance. Los procedimientos manuales, que marcaron la caracterización hacia la sencillez, dieron paso a sistemas de prensado con aire (Pérez, 1992: 53). Luego el aceite hidráulico fue el material empleado para realizar la presión adecuada. Al llegar allí se preveía, erróneamente, que no existiría algún otro mecanismo que fuese capaz de alcanzar los mismos niveles de eficiencia en relación tiempo-costado de operatividad. Pero no fue así. Los sistemas de prensado con gases inertes entraron en juego mediante controles automatizados y computarizados.

En los actuales momentos se han introducido sistemas robotizados de control de torque. La reingeniería de los procesos de producción industrial de madera laminada se halla en constante evolución, inmersa en procesos industriales complejos. Las innovaciones tienden a desplazar en un corto tiempo a los modelos de equipos existentes para sustituirlos por otros donde la participación de los operarios sea cada vez más reducida.

Algunos escritos que sustentan la presente investigación en torno a los conocimientos de las técnicas, aplicaciones y clasificación de los tipos de Madera laminada estructural

El “Manual de madera laminada” de Pérez (1992), editado por la universidad del Bio Bio; así como el texto “Estructuras de Madera” de Rodríguez (1999).

Antecedentes relacionados con la geometría de los arcos estudiados: los textos, “Geometría de los arcos Guía para la construcción y trazado de arcos”, de Sánchez (2011); “Sistemas de estructuras” de Engel (2001) y el artículo titulado “Basket-Handle Arch and Its Optimum Symmetry Generation as a Structural Element and Keeping the Aesthetic Point of View” de Alcayde *et al* (2019).



El contenido de este artículo tiene como antecedente sustancial el Trabajo Especial de Grado (con diferentes modificaciones) titulado: “Máquina para fabricar arcos con madera laminada de pino Caribe para edificaciones agroindustriales. Concepción geométrica” (Páez, 2018). Aprobado para adquirir el grado de Especialista en Gerencia de Proyectos de Investigación y Desarrollo, en la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad Central de Venezuela.

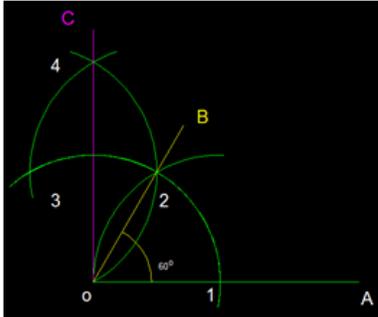
De igual modo el contenido queda incluido en la línea de investigación titulada: Gestión del conocimiento para la innovación tecnológica en los procesos edificatorios; del Instituto de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía, campus Maracay UCV, de la cual el autor es investigador responsable.

Materiales y métodos

La presente fue una investigación de tipo exploratoria-cualitativa para una propuesta teórica de concepción geométrica para un prototipo de máquina manual y sencilla para la fase de prensado, dentro de la manufactura industrial de arcos carpaneles con madera laminada encolada de calidad estructural.

Las entidades geométricas empleadas para este estudio fueron extraídas de los procedimientos de dibujo con regla y compás quedando agrupadas en dos subconjuntos:

Los trazos rectilíneos: obtención de ángulos de 60-90° y bisectriz de un ángulo para conseguir los de 15, 30 y 45° y mediatriz de un segmento recto (cuadro 1).

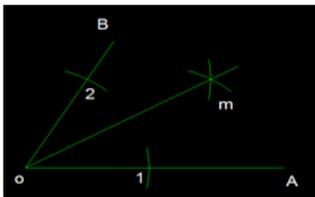
Cuadro N° 1.**a. Entidades geométricas rectilíneas obtenidas por procedimientos de dibujo con regla y compás aplicadas en esta investigación****1. Ángulos de 60 y 90°**

Dada una recta horizontal hacer centro en el extremo o trazando un arco de circunferencia con abertura cualquiera, que corte a la recta en el punto 1.

Con la misma abertura y centro en 1 trazar un semiarco que corte al anterior se obtiene el punto 2.

Al trazar una recta que una a o con 2 se obtiene el ángulo de 60° AoB. A partir del punto 2 se traza un semiarco que corte al anterior en el punto 3.

Haciendo centro en 3 se traza un semiarco que corte al anterior obteniendo el punto 4 que al unirlo en línea recta con el origen o se forma el ángulo de 90° AoC.

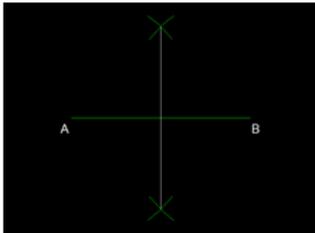
2. Bisectriz de un ángulo cualquiera

Dado un ángulo cualquiera AoB;

A partir del vértice o se trazan semiarcos que corten los lados en 1 y 2.

Con la misma abertura de compás y haciendo centro en 1 y 2 se trazan semiarcos que se corten en el punto m.

La recta que une o con m es la bisectriz.

3. Mediatriz de un segmento de recta cualquiera

Dada la recta AB,

Hacer centro en el punto A y trazar dos semiarcos con una abertura de compás aproximadamente mayor a la mitad del segmento.

Sin variar la abertura del compás, ahora haciendo centro en B, se trazan otros dos semiarcos que corten a los anteriores.

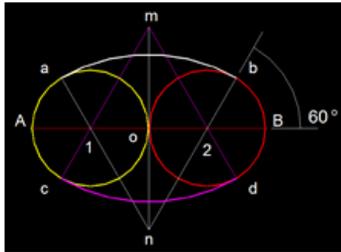
Al unir los puntos donde se cortan los semiarcos trazados se obtiene la mediatriz.

Los métodos con regla y compás que dan como resultado formas curvas: óvalos de tres centros (dado su eje mayor) y trazo de un arco de tres centros (cuadro 2).

Cuadro N° 2.

b. Entidades geométricas curvilíneas obtenidas por procedimientos de dibujo con regla y compás aplicadas en esta investigación

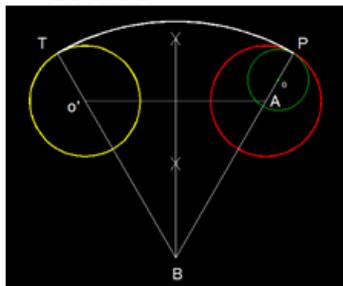
4. Trazo de un óvalo dado su eje mayor



Trazar el eje mayor horizontal recta AB. Trazar mediatrices para obtener los puntos 1, o y 2. Con centro en 1 y 2 obtener circunferencias con radio $1A=2B$. Trazar ángulos de 60° respecto a la horizontal que tengan vértices en 1 y 2, donde estos se corten con la mediatriz que pasa por o se obtienen los puntos m y n que serán los centros para dibujar las porciones curvas centrales del óvalo.

Referencia: Elaboración propia.

5. Enlazar dos circunferencias por medio de un arco que parta del punto P dado en una de ellas



Se une el punto P con el centro o de la circunferencia que lo contiene, prolongando la recta indefinidamente.

Partiendo de Po se lleva una distancia igual al radio de la otra circunferencia obteniendo así el punto A que se une con el punto o' de la otra circunferencia.

Se obtiene la mediatriz que se prolonga hasta cortar en B a la continuación de PA. Este punto B será el centro del arco de circunferencia

Referencia: Calderón (1978: 92).

Todas las entidades dibujadas para esta investigación fueron solucionadas gráficamente con herramientas computacionales, empleando una versión educativa y gratuita de Autocad® un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD por sus siglas en inglés) con el cual están familiarizados los arquitectos e ingenieros en su práctica creadora; el cual posee, entre muchas otras facilidades, comandos específicos para la representación, cual si fuesen dibujados mediante técnicas de “construcción con regla y compás”.

En esta investigación se emplearon soluciones gráficas mediante la obtención de distintos modelos de arcos carpaneles de tres centros a partir del estudio del trazo con regla y compás de un óvalo, dado el eje mayor y sus rectas tangentes (Alcayde *et al.*, 2019: 9).

La metodología aplicada para idear la máquina propuesta tuvo como punto de partida, en su diseño conceptual, una idea geométrica intuitiva mediante un procedimiento descriptivo para la obtención de puntos de tangencia de circunferencias agrupadas entre sí y cumplió con la siguiente secuencia gráfico-geométrica (figura 2)

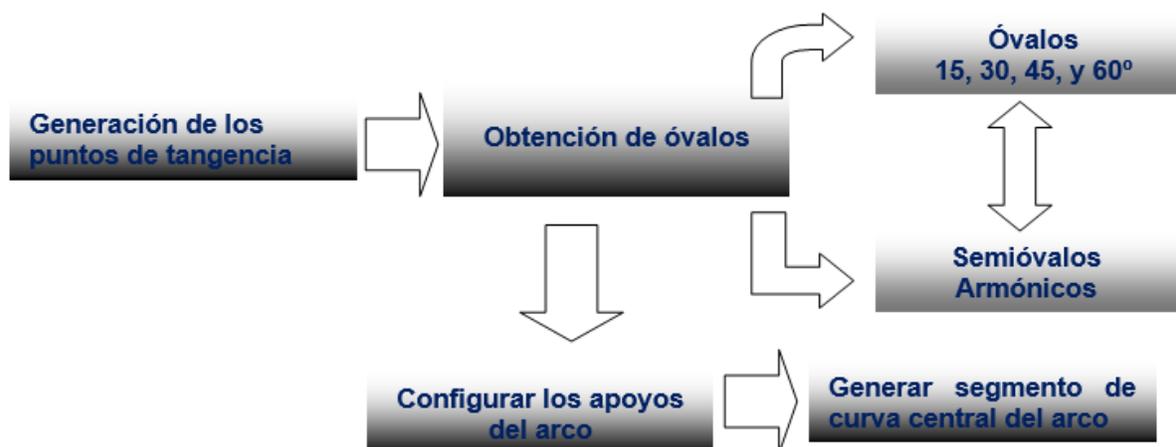


Figura 2. Secuencia metodológica para el diseño conceptual de la máquina propuesta.

Generación de los puntos de tangencia entre circunferencias

Al unir dos circunferencias entre sí estas poseen un solo punto de tangencia; en tal caso la unión se realiza una a una (1:1).

En el caso en que se presenta la unión entre tres circunferencias solo una de ellas comparte dos puntos de tangencia (1:2).

Cuando se logra la unión entre cuatro circunferencias resultan cuatro puntos de tangencia y cada una de ellas se une a otras dos 2 (2:1).

Se obtiene así un centro para el trazado de una circunferencia de mayor diámetro, que circunscribe con nuevos puntos de tangencia que tocan simultáneamente a las cuatro circunferencias iniciales (figura 3).

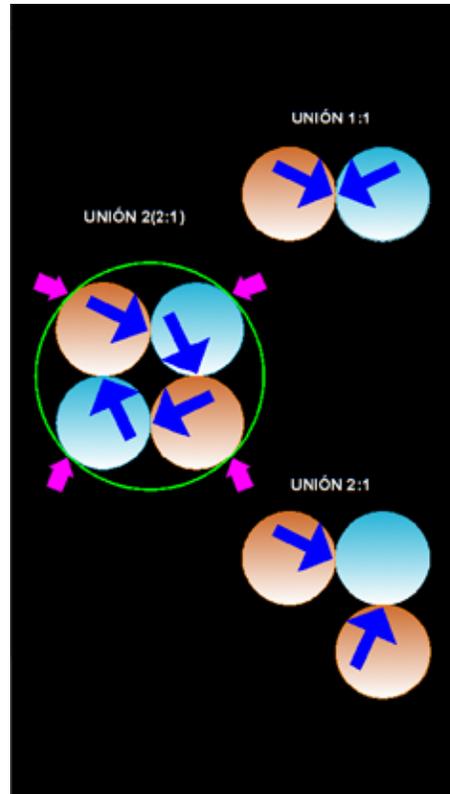


Figura 3. Circunferencia de diámetro mayor que circunscribe a las cuatro circunferencias iniciales generando cuatro puntos de tangencia.

Fuente: Elaboración propia con base en Páez, 2018.

Obtención de óvalos de 15, 30; 45 y 60°

La configuración gráfica de la máquina manual-sencilla para fabricar arcos con madera laminada respondió al trazado geométrico del óvalo a partir de dos circunferencias unidas por un solo punto de tangencia.

El óvalo es la figura geométrica idónea que se emplearía para la fabricación de los arcos carpanteles de tres centros para obtener distintas longitudes de curva tangentes.

Calderón (1978) y Osers (2006), describen la representación de óvalos trazados, con el método de construcción con regla y compás, empleando fundamentalmente la ubicación de los puntos de tangencia conformando un ángulo de 60°, pocos autores emplean ángulos de 45°.

Procedimientos para el trazado de óvalos con ángulos de 15 y 30° en la literatura revisada, hasta ahora, no se han encontrado.

Sin embargo, Páez (2002) definió que para el trazo de un óvalo puede ubicarse el punto de tangencia respecto al diámetro horizontal en cualquier ángulo, entre 0 y 90° (p. 63); también, por ejemplo, a 30°; para emplear así los ángulos trascendentales que se logran construir con regla y compás (figura 4).

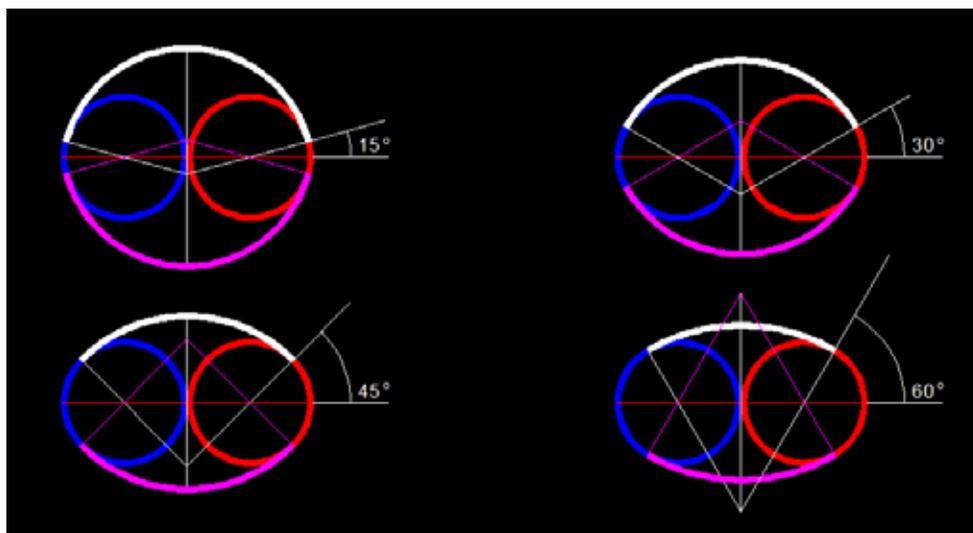


Figura 4. Representación de óvalos con los puntos de tangencia ubicados a 15, 30, 45 y 60°.

El trazo de dos circunferencias cada una con centro en los vértices obtenidos en la intersección de las rectas a 15, 30, 45 y 60° (figura 5) permite obtener óvalos de tres centros dado el eje mayor, además de la generación de circunferencias distintas unas a otras demostrándose que a menor ángulo en grados más se reduce el diámetro de la circunferencia envolvente.

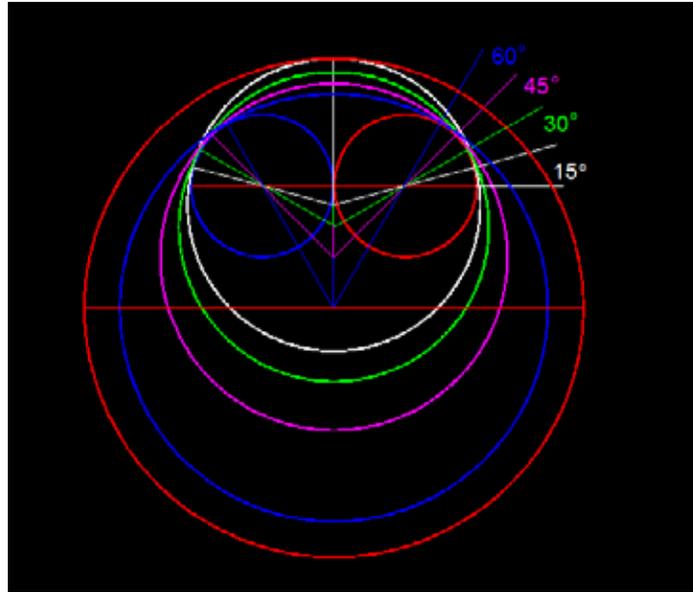


Figura 5. Circunferencias que se obtienen con ángulos de 15, 30; 45 y 60°.
 Fuente: Elaboración propia (2020) con base en Páez (2018).

Resultados

Sin un procedimiento geométrico acertado es poco probable presentar con éxito un modelo de máquina manual para un proceso donde la madera maciza de los árboles, después de aserrada, sea reconvertida en componentes estructurales curvos para techar espacios construidos.

En esta investigación se plantean los siguientes aportes para solucionar la configuración geométrica de una máquina manual:

Aportes geométricos de la investigación

Los procedimientos geométricos, sin uso de reglas graduadas u otros instrumentos de precisión, que dan como resultado gráfico la obtención de cuatro circunferencias inscritas en una circunferencia de mayor diámetro y que son tangentes entre sí, constituyen un procedimiento que ya es conocido y se ha practicado por siglos, en las construcciones con regla y compás, desde mucho antes del período clásico griego. No obstante, no se había planteado que, además

de obtener puntos de tangencia entre las cuatro circunferencias de menor diámetro, se lograsen también óvalos que quedasen inscritos en la circunferencia de mayor diámetro. Este es un aspecto novedoso que ha de ser considerado como el primero de los aportes logrados en esta investigación.

Las cuatro circunferencias inscritas con los ángulos seleccionados (15, 30, 45 y 60°) consiguen generar el trazo de máximo cuatro óvalos también inscritos en la circunferencia de mayor diámetro.

En el caso de seleccionar un ángulo de 15, 30, 45 o 60° el trazo geométrico de los óvalos con una secuencia de uno, dos y cuatro óvalos responde a la siguiente representación gráfica (figura 6 y 7).

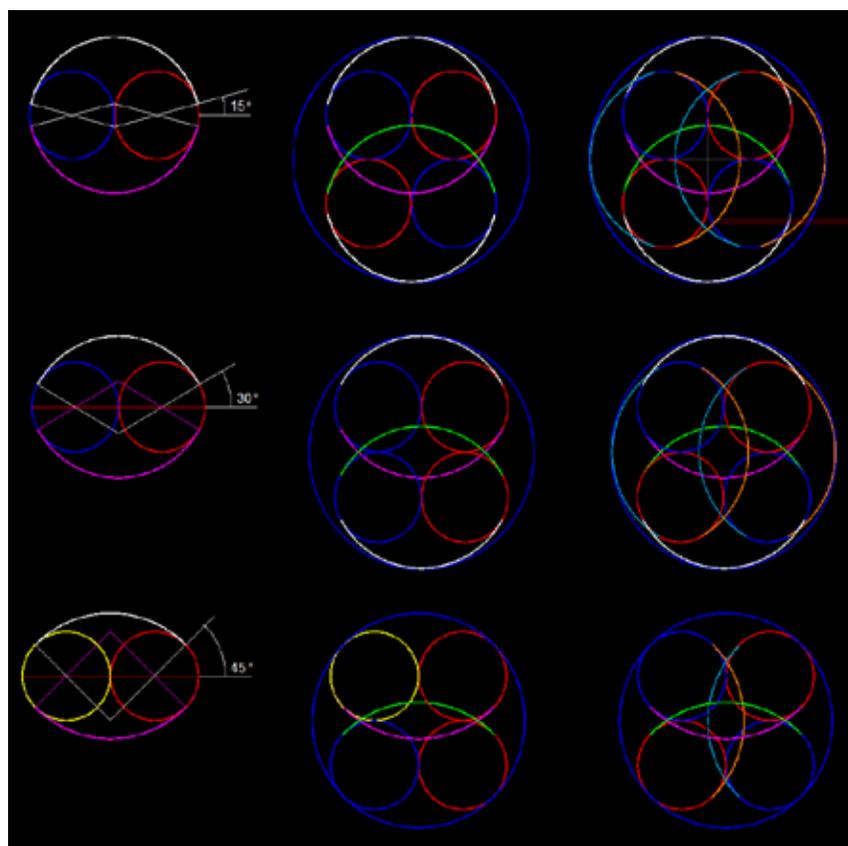


Figura 6. Secuencia del trazo geométrico de uno, dos y cuatro óvalos con ángulos de 45°, inscritos en la circunferencia.

Fuente: Elaboración propia con base en Páez, 2018

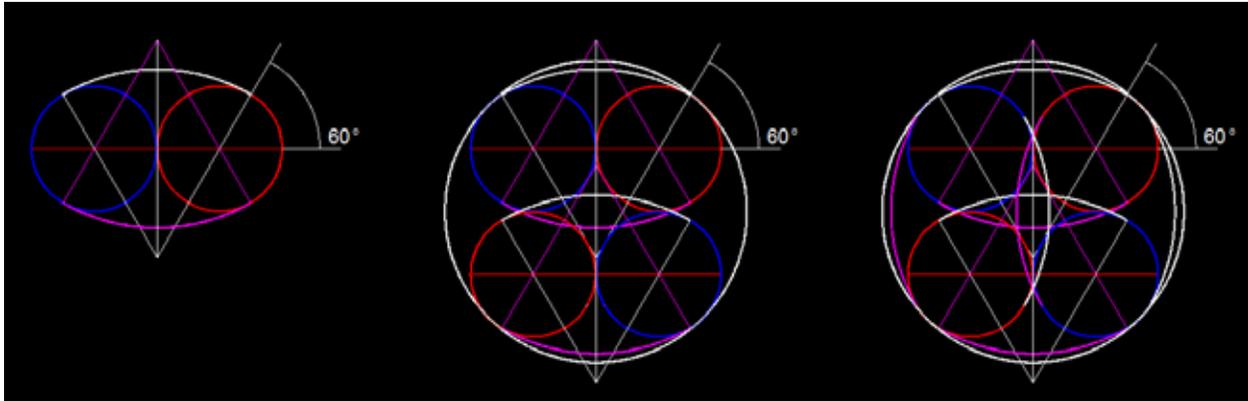


Figura 7. Secuencia del trazo geométrico de uno, dos y cuatro óvalos con ángulos de 60° inscritos en la circunferencia.

Fuente: Elaboración propia con base en Páez, 2018.

Circunferencias para configurar los apoyos del arco

Cada uno de los apoyos en los extremos del arco requiere menos de $\frac{1}{4}$ de circunferencia, ubicada en cada uno de los extremos, para su moldeado y prensado, los cuales se pueden fabricar de forma simultánea (figura 8).

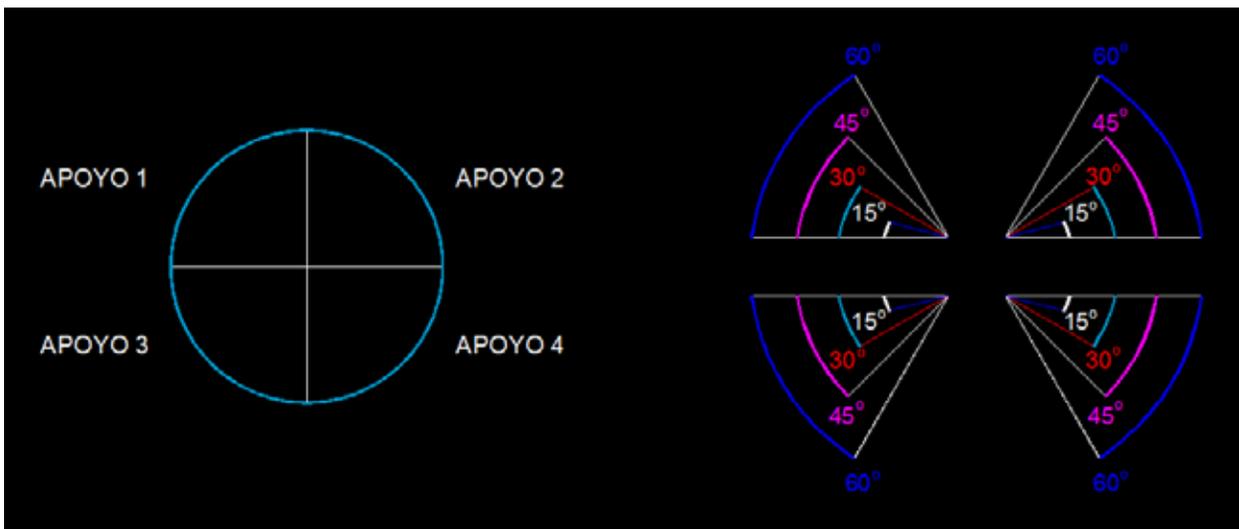


Figura 8. Propuesta geométrica para obtención de apoyos para un arco carpanel a partir del seccionamiento de una circunferencia en cuatro partes iguales.

Fuente: Páez, 2017.

Al prensar una circunferencia, si el ángulo seleccionado es 15° se obtienen 24 apoyos;

12 en el caso de 30° ;

8 apoyos cuando el ángulo seleccionado es 45°

y 6 apoyos para un ángulo de 60° (figura 9).

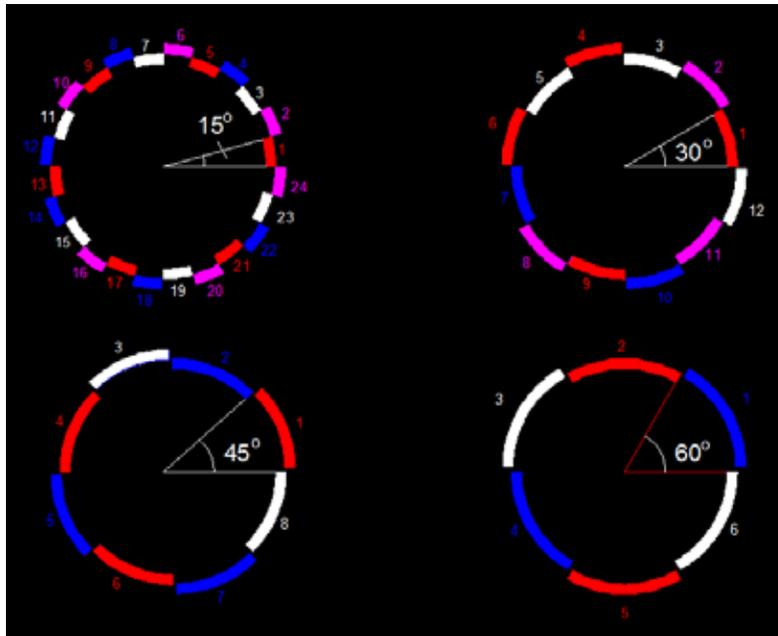


Figura 9. Apoyos para un arco carpanel obtenidos con la subdivisión de una circunferencia ángulos de 15, 30, 45 y 60° .

Segmentos de curvas centrales del arco

Los óvalos inscritos en la circunferencia de mayor diámetro, empleando ángulos de 15, 30, 45 o 60° ; generan un diverso conjunto de posibilidades para la obtención de arcos de diferentes longitudes de curva y curvatura; las cuales son factibles de emplearse como fracciones del trazo de un arco carpanel de tres centros y de otras modalidades de arcos como componentes estructurales de un espacio construido de acuerdo a la siguiente clasificación:

Curvas tipo A: el segmento de curva central del arco carpanel de tres centros que se obtiene al seccionar una circunferencia de mayor diámetro que se produce al completar el trazado del óvalo.

Curva tipo B: porción de curva de mayor longitud que se genera en el perímetro central de la circunferencia de mayor diámetro que no está relacionada con el trazo de los óvalos.

Curva tipo C: porción de curva de menor longitud que las curvas tipo A y tipo B que se genera en el perímetro central de la circunferencia de mayor diámetro que no está relacionada con el trazo de los óvalos.

Para dos óvalos inscritos en una circunferencia de mayor diámetro con ángulos de 15, 30, 45 o 60° los resultados geométricos son los siguientes (figura 10):

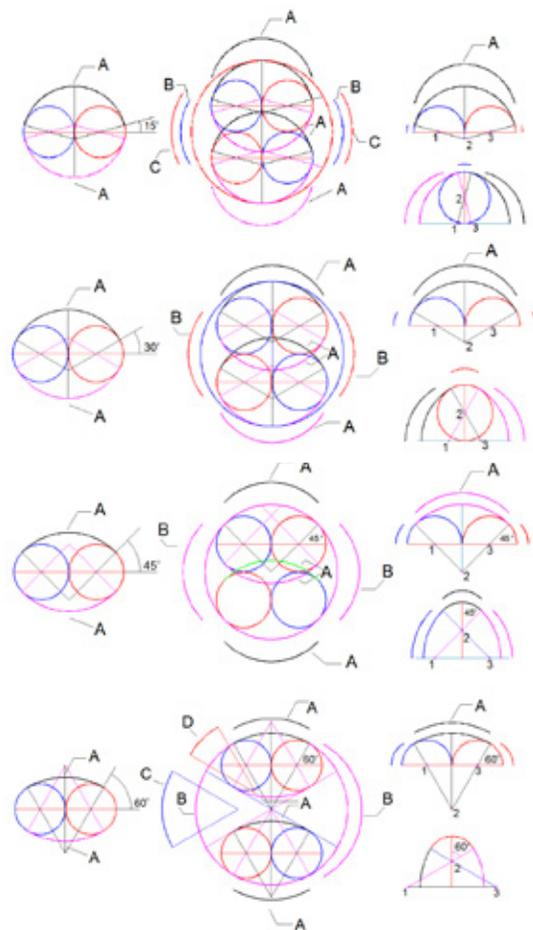


Figura 10. Algunos segmentos de curvas que se obtienen como resultado del método geométrico con regla y compás propuesto para la máquina de prensar arcos con madera laminada.

Salvar grandes luces sin apoyos intermedios

Una de las ventajas de la madera laminada es salvar grandes luces sin apoyos intermedios. Ante esta premisa la configuración geométrica propuesta en esta investigación también es válida mediante la aplicación de una variación geométrica denominada «Enlazar dos circunferencias por medio de un arco que parta de un punto P (cualquiera) dado en una de ellas» (Calderón, 1978: 92). El procedimiento para el trazo ya fue suficientemente explicado en el cuadro N° 2 del presente artículo.

Rodríguez (1999) designa a los arcos, en una clasificación de estructuras laminadas, como «Miembros Curvos» que “Para el caso de los flexocomprimidos, las luces pueden abarcar desde los 30 a los 100 m” (p. 28). Lo cierto es que esta distancia máxima entre apoyos de aproximadamente cien metros ha sido superada ya en distintos recintos construidos con madera laminada; por ejemplo, el Pabellón de Hamar, en Noruega, para las olimpiadas de Invierno que posee una impresionante estructura constituida por un arco longitudinal de 260 metros y arcos transversales de 96 metros de luz sin apoyos intermedios (Rodríguez, 1999: 68); mencionado por Páez (2017: 114).

Discusión

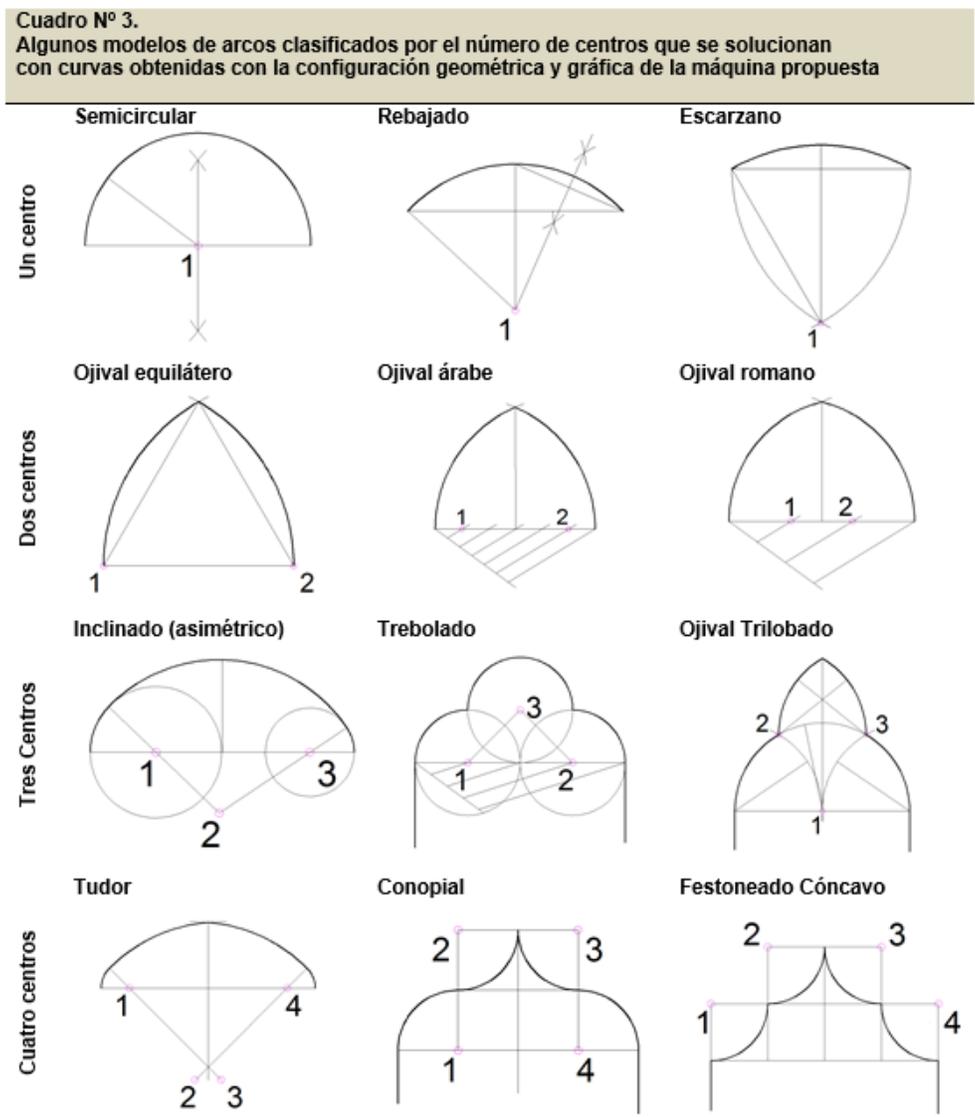
Entre las distintas modalidades de arcos como componentes para sistemas de sustentación estructural con madera laminada el arco carpanel es uno de los que merece ser más estudiado.

Para su trazo gráfico con regla y compás existe una variedad de más de 15 métodos que arrojan resultados diferentes bajo una misma caracterización: arcos conformados por tres o más curvas, siempre en número impar, con los centros no alineados; lo cual refiere a que los radios de curvatura no poseen la misma longitud.

La condición geométrica de tres, cinco o más centros conlleva a desarrollar una curva fraccionada en diferentes porciones, que, en el caso de construirlos con madera laminada, facilitarían tareas de fabricación, transporte al sitio de obra, montaje final; deconstrucción y reutilización.

Los arcos poseen variables de clasificación: por la función que desempeñan dentro de la edificación, por el modo de sustentación y en el caso de su generación geométrica con regla y compás se clasifican según el número de centros (arcos de 1, 2, 3, 4 o más centros).

A continuación, se presentan algunos distintos modelos trazados con regla y compás empleando las curvas que resultan de los procedimientos aplicados para configurar geoméricamente la máquina propuesta.



Cuadro de elaboración propia (2020).

Referencias: Sánchez, 2011.

Algunos modelos de estructuras con madera laminada que coinciden en su configuración curvilínea a las porciones de arcos obtenidos en la propuesta de esta investigación

Arcos de configuración geométrica libre

Los arcos de configuración geométrica libre son aquellos que responden a infinitas posibilidades gráficas de disposición espacial de las porciones de curvas que se logran generar con la propuesta geométrica que arroja esta investigación (figura 11).



Figura 11. Configuración de uno de los modelos de arcos de semicircunferencia que se pueden generar.

Fuente: <https://maderera-andina.com/vigas-laminadas/>

Arcos de curvas de semicircunferencias

Con base en modelos de semicircunferencia mediante la concepción geométrica de la máquina propuesta se configuran *arcos de medio punto* (figuras 12 y 13) que tienen como longitud de la distancia entre los apoyos el diámetro de cualquiera de las circunferencias inscritas o de la circunferencia circunscrita de mayor diámetro.

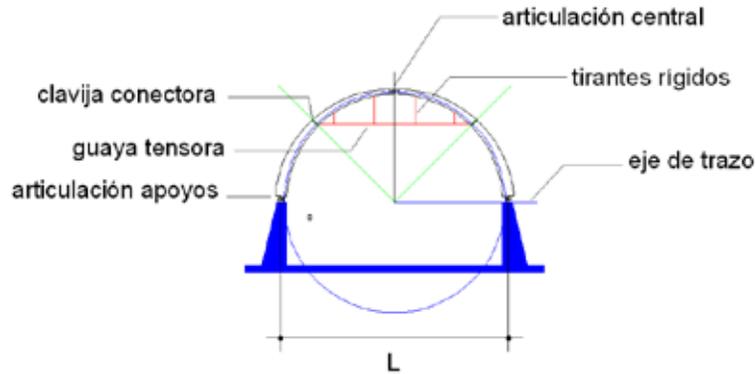


Figura 12. Configuración de uno de los modelos de arcos de semicircunferencia que se pueden generar.



Figura 13. Arcos triarticulados de semicírculo con madera laminada.

Fuente: <https://www.quora.com/How-do-you-make-furniture-with-composite-wood>

Arcos carpaneles de curvas de semióvalos.

Estos arcos quedan agrupados en dos conjuntos geométricos los de configuración aproximada a una parábola y los que se aproximan a una semielipse:

Arcos carpaneles de tres centros como componentes estructurales de perfil aproximado de parábolas (eje menor en posición horizontal y semieje mayor vertical)

Los arcos carpaneles de configuración gráfica aproximada a una parábola (figuras 14 y 15), son aquellos donde la distancia entre los apoyos al piso está determinada por el eje menor del semióvalo, y el semieje mayor es la altura desde el centro de la distancia entre los apoyos o

nivel de piso terminado (n.p.t) hasta la parte central de la curva que genera la estructura (Páez, 2014: 78).

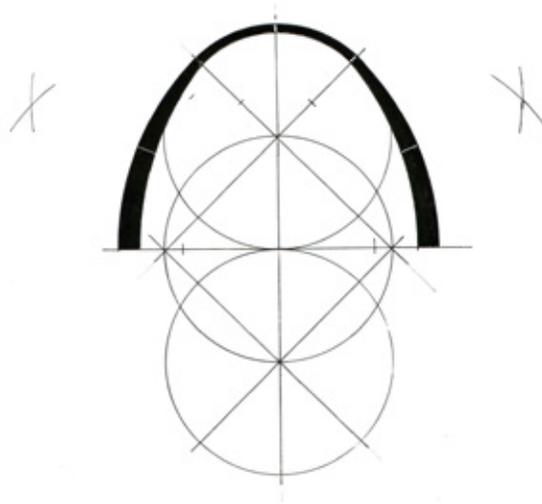


Figura 14. Arco carpanel de configuración aproximadamente parabólica.
Fuente: Páez (2008: 173; 2014: 78).



Figura 15. Arcos de parábolas con madera laminada.
Fuente: <https://arquigrafico.com/vigas-de-madera-laminada-estructural/>

Arcos carpaneles de tres centros como componentes estructurales de perfil aproximado de semielipse (eje mayor en posición horizontal y semieje menor vertical)

Los arcos carpaneles de tres centros y configuración gráfica aproximadamente similar a una semielipse (figuras 16 y 17) son aquellos donde la distancia horizontal entre los apoyos está determinada por el eje mayor del semióvalo y el semieje menor es la altura desde el centro del eje mayor en el nivel de piso terminado (n.p.t) y la cresta o parte central de la curva que genera la estructura (Páez, 2018: 168).

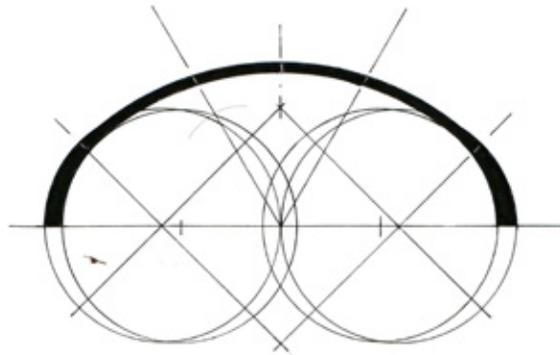


Figura 16. Arco carpanel de configuración semielíptica.

Fuente: Páez (2008: 168).

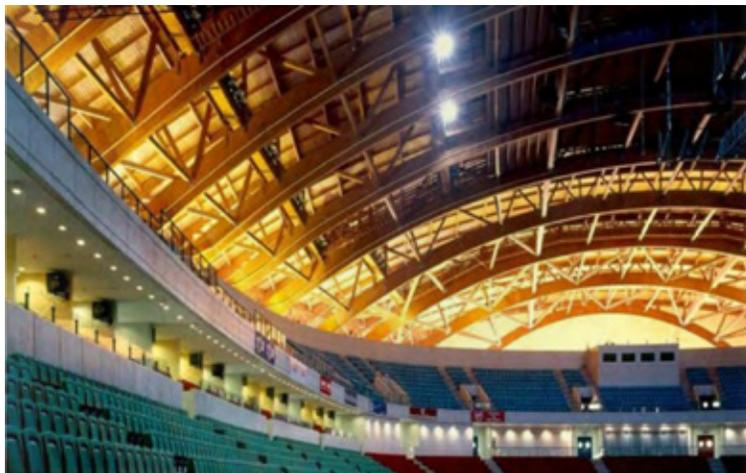


Figura 17. Arcos con madera laminada para la solución estructural del Pabellón Utopía. .

Fuente: <https://ar.pinterest.com/pin/521784306800602694/>

Conclusiones

La importancia de haber alcanzado una propuesta de configuración geométrica de una máquina para prensar arcos con madera laminada significa un avance tecnológico, un paso hacia adelante, volviendo a lo básico, considerando la posibilidad de que este proceso industrial se resuelva mediante una máquina manual, sencilla y económica, más que un salto hacia atrás, esta es una propuesta disruptiva que rompe con el planteamiento de que solo se pueden lograr soluciones estructurales duraderas, estéticas y rentables con maquinarias complejas, costosas y sofisticadas.

Lógicamente, el resultado esperado es un componente estructural curvo de bajo coste, que cumpla con estándares de calidad para ser empleado en la construcción de edificaciones que requieran de un rápido montaje, de una construcción y deconstrucción sin desperdicios, de la reutilización o reciclaje sin generar residuos. En fin, se trata de un proceso enmarcado en un nuevo enfoque de la construcción convirtiéndola en una actividad conservacionista, protectora del medio ambiente, económica y sustentable.

El modelo seleccionado en esta investigación para la concepción geométrica de la máquina para fabricar arcos carpaneles con madera laminada, consiste en la representación de óvalos inscritos en una circunferencia de mayor diámetro. Este es un aspecto innovador para solucionar la estructura de arcos para techos en edificaciones.

La geometría en esta investigación constituye el aspecto preponderante. No se han hallado, hasta donde ha sido indagado, razones científicas que expliquen dos aspectos gráficos en los que está fundamentada la selección del modelo geométrico para concebir la máquina manual que aquí se propone:

Uno es el trazo de óvalos de tres centros dado el eje mayor con ángulos con respecto al radio horizontal distintos a 45° y a 60° . Aquí se han propuesto dos ángulos adicionales de 15° y 30° y se ha demostrado gráficamente como cada opción da curvas de diferentes longitudes y curvatura, que se pueden emplear como propuesta para solucionar arcos carpaneles de tres centros con madera laminada.



Otro es, a partir de un problema geométrico intuitivo; ya conocido mediante la técnica de construcción con regla y compás, que consiste en la obtención de circunferencias tangentes inscritas en otra de mayor diámetro, pero que dan la opción del trazo gráfico de semióvalos a partir de las circunferencias inscritas.

Una vez que ha sido definido como resultado el modelo conceptual para la geometrización, la prospectiva de esta Línea de Investigación conduce, en un futuro próximo, al desarrollo experimental de un primer prototipo de la máquina para el prensado de arcos carpaneles con madera laminada; con planos de detalle; seguido de la elaboración de una propuesta de sistema constructivo donde se empleen los elementos curvos a producir como elementos estructurales portantes de una edificación.

Referencias bibliográficas

- Abajo, J. & Delgado, N. (2015). Geometría del arco carpanel. *Sumat* 79. pp 17-25. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/96398/17>
- Alcayde, A. *et al.* (2019). Basket-Handle Arch and Its Optimum Symmetry Generation as a Structural Element and Keeping the Aesthetic Point of View. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/339107170>
- Bermúdez, G. (1993). Diccionario del arquitecto. Miguel Ángel García e Hijo. S.R.L.
- Calderón, F. (1978). Dibujo técnico industrial. Editorial Porrúa.
- Descartes, R. (1649). La geometría. Recuperado de <http://www.gutenberg.org/files/26400/26400f>
- Engel, H. (2001). Sistemas de estructuras. Editorial GyG.
- FAO. (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. Informe Venezuela (República Bolivariana de). Roma. Recuperado de <http://www.fao.org/3/cb0114es/cb0114es.pdf>
- Feria, M. Espinosa, L. & Martínez, N. (2006). Percepción espacial y geometría intuitiva. Una puerta de entrada al aprendizaje significativo de la geometría. Editorial Externado de

Colombia.

Franco, W. (2003). Plan nacional del sector forestal. Instituto de Planificación y Desarrollo.. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Wilfredo_Franco4/publication/309287041

González, P. (2003). Los orígenes de la geometría analítica. Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia.

MPPEHV. (2014). Informe del Mapa de Cobertura Vegetal de Venezuela. Dirección General de Bosques, Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo, Hábitat y Vivienda. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-az372s.pdf>

Morales, M. (2007). Construcciones con regla y compás (I): introducción y primeras construcciones. <https://www.gaussianos.com/construcciones-con-regla-y-compas-i-introduccion-y-primeras-construcciones/>

Oser, H. (2006). Estudio de geometría descriptiva. Tomo I. Proyección cilíndrica. Caracas. Editorial Torino.

Páez, R. (2018) Máquina para fabricar arcos con madera laminada de pino caribe para edificaciones agroindustriales. Concepción geométrica. Trabajo Especial de Grado (no publicado) presentado ante la Universidad Central de Venezuela para optar al grado de Especialista en Gerencia de Proyectos de Investigación y Desarrollo. Caracas.

Páez, R. (2017). Arcos con madera laminada del pino Caribe venezolano. Una propuesta para procesos de arquitectura ecosustentable. Gestión I+D Vol. 2, N° 1, 95-125.

Páez, R. (2014). La madera laminada de pino Caribe dentro del proceso de desarrollo sustentable de la construcción. Caso de estudio: arcos bi y triarticulados. Tecnología y Construcción. N° 28-II del IDEC-FAU-UCV. Pp 64-83.

Páez, R. (2008). Madera laminada de pino caribe para estructuras sometidas a flexocompresión. Caso de estudio: El arco triarticulado y su aplicación en construcciones agroindustriales.



Trabajo de ascenso de Instructor a Profesor Asistente (no publicado). Facultad de agronomía – UCV.

Páez, R. (2002). Fundamentos geométricos del arco semielipsoidal. Trabajo de Grado (no publicado) para obtener el Título de Magister Scientiarum en Desarrollo Tecnológico de la Construcción. IDEC-FAU-UCV.

Pérez, V. (1992). Manual de madera laminada. Instituto Forestal Corporación de Fomento de la Producción. Santiago de Chile.

Rodríguez, M. (1999). Diseño estructural en Madera. AITIM.

Saad, A. (1985). Tratado de construcción. Tomo segundo. Editorial Upadi.

Sánchez, N. (2011). Geometría de los arcos Guía para la construcción y trazado de arcos. Consejería de Educación, Formación y Empleo. Región de Murcia.

Torroja, E. (1998). Eduardo. Razón y ser de los tipos estructurales. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Wood choice. (2019) Diferencias entre una cepilladora y una canteadora. [Archivo de video]. <https://www.youtube.com/watch?v=D4UaLD4MONI>

Aclaratoria

En inglés el arco carpanel es designado «*basket-handle arch*» que literalmente significa «arco del asa para cesta». Ambas denominaciones serán omitidas en este escrito en virtud de que no reflejan el carácter geométrico de la investigación.