

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**SIMULACIONES NUMÉRICAS DEL FENÓMENO DE CONVECCIÓN
DE CALOR MEDIANTE UN SISTEMA COMPUTACIONAL CON
PROCESAMIENTO PARALELO**

**PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES
García M., Alfredo E.
Nieto S., Ayram G.
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

CARACAS, 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

SIMULACIONES NUMÉRICAS DEL FENÓMENO DE CONVECCIÓN DE CALOR MEDIANTE UN SISTEMA COMPUTACIONAL CON PROCESAMIENTO PARALELO

**Tutor Académico:
Julio Segura**

**PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES
García M., Alfredo E.
Nieto S., Ayram G.
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

CARACAS, 2005

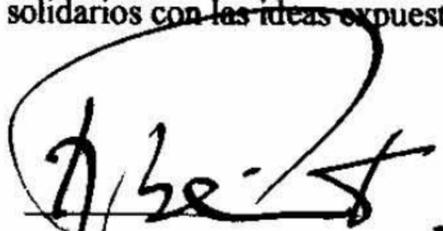
Caracas, 16 de Junio de 2.005

ACTA

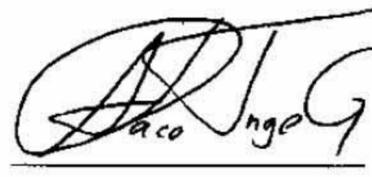
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Garcia, Alfredo y Nieto, Ayram titulado:

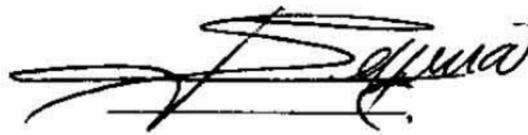
“SIMULACIONES NUMÉRICAS DEL FENÓMENO DE CONVECCIÓN DE CALOR MEDIANTE UN SISTEMA COMPUTACIONAL CON PROCESAMIENTO PARALELO.”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Rodolfo Berrios.
Jurado.




Prof. Francisco Garcia
Jurado.


Prof. Julio Segura
Tutor Académico.

RESUMEN

GARCÍA M., Alfredo E. y NIETO S., Ayram G.

“SIMULACIONES NUMÉRICAS DEL FENÓMENO DE CONVECCIÓN DE CALOR MEDIANTE UN SISTEMA COMPUTACIONAL CON PROCESAMIENTO EN PARALELO”

Tutores Académicos: SEGURA, Julio y BARRAGÁN, Antonio. Tesis Ing. Mecánico. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2005. 122p

Palabras Clave: Procesamiento Paralelo / Dinámica de Fluidos y Transferencia de Calor Computacionales

Con este trabajo se generó una plataforma computacional, basada en computadoras personales y el *software* CFX-5 para realizar simulaciones numéricas de convección de calor con procesamiento paralelo, incluidas visualizaciones y animaciones (ambas en 3-D), considerando la adecuación de la infraestructura requerida (espacio físico, mobiliario y conexiones de red).

Para ello se, realizaron distintas evaluaciones y, en cuanto a requerimientos y disponibilidades de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la U.C.V., se determinó la mejor infraestructura para la plataforma, así como también la configuración óptima de la red heterogénea con sistemas operativos Linux y Windows.

Una vez concluidas estas tareas se realizó la instalación del *software* CFX-5 con el cual se ejecutaron las simulaciones numéricas utilizando procesamiento secuencial y paralelo. Dichas simulaciones son producto del estudio de cuatro (4) casos de convección de calor para un fluido con alto número de Prandtl, en régimen de flujo laminar, entre dos cilindros circulares concéntricos con temperatura superficial preescritas.

DEDICATORIA

A mi Madre: **Ingrid Suárez**, ya que sin ella no estaría donde estoy.

A mi **Familia**, ya que sin su apoyo, no estaría culminando esta etapa en mi vida.

A mis **Amigos** por soportar mi humor y mal genio.

A mis **Compañeros de la U.C.V.** que brindaron alojamiento, noches, fines de semanas y días feriados de estudio, momentos gratos y fiestas universitarias (“Pinky”, “ExGordo”, “Compa”, “Willy”, “Berny”, “Chines”, “El Luc”, Denisse, Douglas, “Martica”, Leslie, “Juanchi”, Emma, Tamanaco, Hegat, “Tibio”, “Pichón”, Kathy, “ConComae”, Enrique García, Mestre, Padilla, Carmen, Martínez, Pertuz, Berrios, Barragán, Zambrano, Soto, Perera, J.R., Roldán, Lecue, “La Licenciada” y muchos otros.

A todos los que pueda agradecer por su colaboración, *un millón de gracias*

Gerónimo

A DIOS ante todo.

A mi Madre **Zully Medina**, sin ella esto no sería posible.

A todos los amigos, compañeros y familiares que me han acompañado durante esta experiencia: Nelly, Patry, Jesús, Oscar y Ana, July, Carlos Luís y familia, Kim, Rafael, Vanessa, Jeanine y Familia, Leonardo, Damián, Ricardo, Roberto, Pablo, Jaime, Ricardo, Harold, Daniel y Gabriela, Gerónimo, Orfer, Denisse, Henry, Luciano, David, Wila, Thamara, Camlet, Fernando, Michele, Jose Manuel, Carlos, Ronnie, Manuel, Diego, Daniel, Pierina.

A todos los profesores que de una manera u otra han contribuido en mi formación: R. Arcos, M. Padilla, C. Hernández, M. Rodríguez, J.C. Mestre, T. Zambrano, J. Soto, R. Berrios, C. Ferrer, J. Areyan, J. Rodríguez, J. Cruz, J. León, F. Pieterz, J. Barilla, R. Grullon, M. Padrón.

A todos aquellos que lean estas líneas.

Alfredo

AGRADECIMIENTOS

Les agradecemos a todos por el apoyo dado para lograr en buen término el presente Trabajo Especial de Grado como lo son:

Barragán Antonio

Berrios Rodolfo

Ferrer César

García Enrique

García Francisco

Hernández Carmen

Martínez Manuel

Mestre Juan

Padilla Miguel

Padrón María

Pertuz Alberto

Segura Julio

Soto Jolymar

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

A_a	Área de la sección transversal del volumen de control
C_p	Calor específico a presión constante
D	Diámetro
D_o	Diámetro externo
D_i	Diámetro interno
D_h	Diámetro hidráulico
D_i/D_o	Relación de diámetros
dn	Vector normal a la superficie
\bar{F}	Fuerza
Gr	Número de Grashof
g	Aceleración de gravedad
k	Conductividad térmica
L	Longitud en la dirección axial
L_{ef}	Longitud fluidodinámica de entrada
$L_{ef_{lam}}$	Longitud dinámica de entrada para flujo laminar
$L_{et_{lam}}$	Longitud térmica de entrada para flujo laminar
\dot{m}	Flujo másico
P	Perímetro
Pr	Número de Prandtl
p	Presión
q''	Tasa de flujo de calor por unidad de área
Re	Número de Reynolds
Re_D	Número de Reynolds dinámico
P22	Purolub 22
s	Subíndice referente a la superficie
T	Temperatura
T_{Si}	Temperatura de la superficie interna
T_{So}	Temperatura de la superficie externa
T_m	Temperatura media
t	Tiempo
U	Velocidad en cualquier coordenada
U_m	Velocidad media en cualquier coordenada
u	Velocidad en la dirección x
V	Vector velocidad
r	Componente radial
r_o	Radio externo
r_i	Radio interno
r_m	Radio donde ocurre la velocidad máxima
z	Componente longitudinal
α	Difusividad Térmica
ϕ	Propiedad en consideración

ρ	Densidad
μ	Viscosidad dinámica
x	Velocidad en la coordenada “x”
v	Velocidad en la coordenada “y”
w	Velocidad en la coordenada “z”
∂	Derivada parcial / diferencial

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	V
TABLA DE CONTENIDOS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2.....	5
PROCESAMIENTO SECUENCIAL vs. PARALELO	5
<i>Diferencias entre Grid y Cluster</i>	10
<i>Lenguajes de Programación Paralela</i>	10
PROCESAMIENTO PARALELO EN CFX.....	12
<i>Particionamiento</i>	13
<i>Optimización del particionamiento de la malla</i>	14
MPI PARA PROCESAMIENTO PARALELO	15
<i>Como utilizar MPI</i>	15
<i>Cuando Utilizar MPI</i>	15
<i>Optimizando la ejecución en paralelo utilizando “CFX-Solver”</i>	16
<i>Medición del desempeño en paralelo</i>	17
<i>Eficiencia de Memoria</i>	18
CAPÍTULO 3.....	19
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR.....	19
EL PROBLEMA DE GRAETZ	19
LONGITUD DINÁMICA DE ENTRADA	20
LONGITUD TÉRMICA DE ENTRADA	21
INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	22
CONSERVACIÓN DE MASA:.....	24
CONSERVACIÓN EN CANTIDAD DE MOVIMIENTO:	25
CONSERVACIÓN DE ENERGÍA:	26
DISCRETIZACIÓN NUMÉRICA	27
DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE CONSERVACIÓN.....	27
MÉTODO “CONSERVATIVO” DE VOLÚMENES FINITOS BASADO EN ELEMENTOS	30
SOLUCIÓN ANALÍTICA PARA FLUJO DESARROLLADO	30
<i>Distribución de Velocidad</i>	31
PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL P22	33
ALGORITMO DE SOLUCIÓN EMPLEADO POR CFX-5	33

CAPÍTULO 4	35
SISTEMA COMPUTACIONAL.....	35
CAPÍTULO 5	47
SIMULACIONES NUMÉRICAS	47
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS:.....	47
CAPÍTULO 6	96
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
CAPÍTULO 7	99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
CONCLUSIONES	99
RECOMENDACIONES.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXO 1 FRAGMENTO DEL ARCHIVO DE RESULTADOS PARA EL PROCESAMIENTO SECUENCIAL	105
ANEXO 2 FRAGMENTO DEL ARCHIVO DE RESULTADOS PARA EL PROCESAMIENTO PARALELO	115
ANEXO 3 MALLA HÍBRIDA EMPLEADA	116
ANEXO 4 GRÁFICAS DE TEMPERATURA Y PRESIÓN	118
ANEXO 5 ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE SERVICIOS LINUX	122

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 5-1: Valores obtenidos para la velocidad media y la velocidad máxima.....	49
TABLA 5-2: Valores obtenidos para la velocidad media y la velocidad máxima.....	61
TABLA 5-3: Valores obtenidos para la velocidad media y la velocidad máxima.....	73
TABLA 5-4: Valores obtenidos para la velocidad media y la velocidad máxima.....	82

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El uso de técnicas numéricas para la solución de problemas complejos de ingeniería, física aplicada, medicina, etc. es hoy en día una realidad gracias a la implementación de computadoras de alta velocidad y de grandes capacidades de almacenamiento. En función de esa creciente disponibilidad computacional, el desarrollo de algoritmos para la solución de diversos problemas también ha recibido atención por parte de los analistas numéricos, ingenieros y computistas, por mencionar algunos, aumentando también, el número de usuarios de los simuladores numéricos.

En la Unidad Docente y de Investigación de Transferencia de Calor de la EIM de la UCV se desarrollan modelos de simulación numérica para ser aplicados a convección bifásica mediante la aplicación del método de volúmenes finitos (Patankar, 1980). En este método, se integran las ecuaciones que rigen el fenómeno en estudio sobre cada uno de los volúmenes de control en que halla sido subdividido el dominio de solución. Esta integración, distingue este método de las otras técnicas computacionales de transferencia de calor y dinámica de fluidos, y el resultado es que se garantizan los principios de conservación en todo el dominio y en cada sub-dominio. Esta clara relación entre el algoritmo numérico y los principios de conservación son el aspecto más resaltante del método de volúmenes finitos (Versteeg y Malalasekera, 1995).

Este Trabajo Especial es la continuación de una serie iniciada con el de Gil (1998), en los que se emplea el método de volúmenes finitos para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales parciales que constituyen el modelo matemático (Heinbockel, 1996), sólo que en este caso, en vez de implementar un algoritmo de solución mediante un código computacional, se utiliza un “sistema computacional” (software) cuyo nombre comercial es CFX-5, que utiliza el método “conservativo” de volúmenes finitos basado en elementos (EbFVM) (Maliska, 2004). Con el mismo se determina el campo de velocidad y el de temperatura de varios casos de convección de calor. Los resultados de este trabajo serán

comparados con los valores obtenidos de soluciones analíticas para flujo desarrollado con alto número de Prandtl, Kays y Crawford (1980), Keys y Perkins (1985), numéricas obtenidas con otros métodos de solución, empíricas o con datos experimentales.

En la revisión bibliográfica realizada por Segura *et al.* (2005) se encontró un único trabajo donde se estudiaron las regiones de entrada dinámica y térmica para flujo laminar de líquidos con altos números de Prandtl en conductos anulares concéntricos. Éste fue precisamente el desarrollado por López y Ponce (2005).

Un flujo laminar se caracteriza por presentar un valor del número de Reynolds menor al Reynolds crítico ($Re_D \approx 2300$) y en este trabajo especial se realizará el estudio para el aceite Purolub 22 (P22) alto número de Prandtl ($Pr > 100$) y bajo condiciones de flujo laminar.

La generación de un medio discreto o malla es de vital importancia a la hora de resolver algunos problemas complejos de la transferencia de calor y dinámica de los fluidos. El medio a estudiar se divide en espacios más pequeños los cuales, dependiendo del método a utilizar, pueden ser de tamaños semejantes o no.

El método empleado por el sistema computacional “Software” CFX es el Método “conservativo” de Volúmenes Finitos basado en Elementos.

Existen otros métodos los cuales son los precursores del EbFVM y son el Método de Elemento Finito (MEF) y el Método de Volúmenes Finitos (MVF).

El MVF es ampliamente utilizado en ingeniería, con frecuencia es aplicado para resolver problemas de la dinámica de los fluidos y la transferencia de calor. Por sus características éste método no requiere un alto número de iteraciones para que converja satisfactoriamente, ya que en su proceso de solución satisface los principios de conservación sobre cualquier grupo de volúmenes de control, y sobre todo el dominio de cálculo (Versteeg y Malalasekera, 1995). Es por ello que posee una gran ventaja ante los demás métodos numéricos de su especie. Gil (1998), López y Ponce (2004) por mencionar

algunos, han utilizado dicho método dentro de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Central de Venezuela.

El objetivo general de éste Trabajo Especial de Grado es: generar y aplicar la plataforma computacional [“equipos de computación” (hardware) y “sistema computacional” (software)] que se requiere para realizar simulaciones numéricas de convección de calor con procesamiento en paralelo, incluidas visualizaciones y animaciones (ambas en 3-D), considerando la adecuación de la infraestructura requerida (espacio físico, muebles y conexiones de red).

El propósito anterior se logró con la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Actualizar y profundizar la revisión bibliográfica sobre los tópicos involucrados en el tema estudiado.
- Seleccionar y/o especificar la sala y el mobiliario apropiados, sobre la base de la identificación de requerimientos y disponibilidades.
- Revisar detalladamente para incluir en la red y/o el *Cluster* las 9 (nueve) computadoras personales, actualmente en uso ubicadas en la sala de tesis de pre-grado en la planta baja, ofrecidas por la Dirección de la EIM.
- Incluir en la red y/o el *Cluster* las 6 (seis) computadoras personales nuevas proporcionadas por la Dirección de la EIM.
- Determinar la configuración óptima de la red y/o el *Cluster* heterogéneos Linux/Windows NT y homogéneos Linux.
- Instalar el *software* CFX-5.7 [para procesamiento paralelo con cualquier combinación de CPU's (simple o múltiples) o red de computadoras personales (Linux/Windows NT), incluyendo *Clusters* mixtos (Linux/Windows NT)], proporcionado por la Coordinación de Proyectos del IMF.
- Seleccionar, al menos, dos casos típicos de convección de calor a ser simulados y especificar parámetros computacionales, tales como tiempo de ejecución y utilización de memoria.

- Realizar las simulaciones numéricas utilizando el *software* CFX-5, calcular los órdenes de magnitud de los errores y comparar los parámetros computacionales especificados en el punto anterior.
- Analizar los resultados, concluir y recomendar con miras a trabajos futuros, a la luz de las visualizaciones y las animaciones.

Éste Trabajo Especial de Grado pretende cubrir lo relacionado con la adecuación de la infraestructura requerida, la generación de la plataforma computacional y la aplicación de dicha plataforma en las simulaciones numéricas del fenómeno de convección de calor con procesamiento paralelo.

Dichas simulaciones comprenden el estudio de cuatro (4) casos posibles para especificar los parámetros computacionales antes descritos.

CAPÍTULO 2

PROCESAMIENTO SECUENCIAL vs. PARALELO

El Procesamiento en paralelo es un proceso empleado para acelerar el tiempo de ejecución de un programa dividiéndolo en múltiples trozos que se ejecutarán al mismo tiempo, cada uno en su propio procesador. En principio, un programa dividido en n trozos, podría ejecutarse n veces más rápido, que su equivalente en un solo procesador, pero éste es un límite teórico ya que el tiempo de ejecución del programa paralelizado está sujeto a variables de comunicación que afectan su desempeño.

Aunque, en teoría, paralelizar un programa supone un incremento de su velocidad de ejecución, esto no es siempre así, ya que hay muchos casos en los que es imposible la paralelización del programa o proceso, o una vez llevado a cabo ésta, no se aprecia mejora alguna, o en el peor de los casos, se produce una pérdida de rendimiento.

El procesamiento secuencial es un término creado para explicar el procesamiento paralelo. Se define como el procesamiento de datos utilizando un único procesador y una o varias memorias residente en un nodo. Éste tipo de procesamiento es el que se ejecuta en todos los computadores personales comunes.

El procesamiento paralelo (Perales, 2005) es un término utilizado para denotar un grupo de técnicas que son usadas para realizar tareas simultáneas de procesamiento de datos, con el fin de encontrar solución de problemas, como pueden ser los modelos de simulación numérica que requieren considerables cómputos sobre grandes cantidades de datos y demandan gran velocidad de procesamiento, ya que estos cálculos deben ser completados en un periodo razonable de tiempo. En lugar de procesar cada instrucción en forma secuencial como lo haría una computadora convencional con un solo procesador, un sistema de procesamiento paralelo puede ejecutar procesamiento concurrente de datos para conseguir un menor tiempo de ejecución.

El procesamiento paralelo requiere de una plataforma computacional, que podemos describir como una computadora con múltiples procesadores o bien como múltiples computadoras interconectados entre sí. Según Barry y Allen (1999) existen distintos tipos de configuraciones internas posibles para una computadora paralela entre los cuales tenemos:

1. Sistema Multiprocesador con Memoria Compartida (Shared Memory Multiprocessor System), la cual consiste en una computadora especialmente diseñada que posee múltiples procesadores conectados a módulos de memoria, donde cada procesador puede acceder a cualquier modulo de memoria.
2. Sistema Multicomputadora con Paso de Mensajes (Message-Passing Multicomputer), cada computadora está interconectada por medio de una red y está formada por su procesador y su memoria local que no puede ser accedida por otros procesadores. La red interconectada provee a los procesadores la posibilidad de enviar mensajes a otros procesadores. Estos mensajes pueden incluir data que otros procesadores necesitan para sus cálculos.
3. Sistema con Memoria Compartida Distribuida (Distributed Shared Memory), en el cual cada procesador tiene acceso a toda la memoria, utilizando un solo espacio de dirección de memoria. Para que un procesador acceda a una posición que no está en su memoria local, el mensaje de data debe pasar desde el procesador a la posición de memoria y de la posición de memoria al procesador.

El procesamiento paralelo (Perales, 2005) puede ocurrir en el flujo de instrucciones, en el flujo de datos o en ambos. La clasificación de Flynn (1996) divide a los computadores en cuatro grupo principales de la manera siguiente:

- Flujo de Instrucciones Único, flujo de Datos Único (SISD)
- Flujo de Instrucciones Único, flujo de Datos Múltiple (SIMD)
- Flujo de Instrucciones Múltiple, flujo de Datos Único (MISD)
- Flujo de Instrucciones Múltiple, flujo de Datos Múltiple (MIMD)

Flujo de Instrucciones Único, flujo de Datos Único (SISD): Representa la organización de una computadora única que contiene una unidad de control, una unidad de procesamiento y una unidad de memoria. Las instrucciones se ejecutan en forma secuencial y el sistema puede tener o no posibilidades de procesamiento paralelo. En este caso, el procesamiento paralelo puede lograrse mediante unidades funcionales múltiples o mediante una arquitectura paralela.

Flujo de Instrucciones Único, flujo de Datos Múltiple (SIMD): Representa una organización que incluye muchas unidades de procesamiento bajo la supervisión de una unidad de control común. Todos los procesadores reciben la misma instrucción de la unidad de control, pero operan sobre diferentes conjuntos de datos. La unidad de memoria compartida debe contener módulos múltiples para que pueda comunicarse con todos los procesadores simultáneamente.

La estructura Flujo de Instrucciones Múltiple, flujo de Datos Único (MISD) es solo de interés teórico porque no se ha construido ningún sistema práctico utilizando esta estructura.

La organización Flujo de Instrucciones Múltiple, flujo de Datos Múltiple (MIMD) se refiere a un sistema de computadoras capaz de procesar múltiples programas al mismo tiempo la mayoría de los sistemas de multicomputadoras y multiprocesadores pueden clasificarse en esta categoría.

La clasificación de Flynn (1996) se fundamenta en la diferencia entre el desempeño de la unidad de control y el de la unidad de procesamiento. Enfatiza las características de desempeño del sistema de computadoras más que sus interconexiones estructurales y operacionales. Un tipo de procesamiento paralelo que no entra en dicha clasificación es la arquitectura paralela (pipe-line). Las únicas dos categorías utilizadas de esta clasificación son los procesadores de arreglo SIMD y MIMD.

En el sistema utilizado, la arquitectura para la computación paralela esta basada en sistemas con múltiples procesadores (específicamente múltiples nodos) donde las características que les distinguen son:

1. La memoria no es compartida, es decir, cada procesador tiene un mapa de direcciones propio que no es accesible directamente desde los demás.

2. La comunicación entre procesadores es por paso de mensajes a través de la red de interconexión.

El procesamiento por arquitectura paralela es una técnica de implantación en donde las suboperaciones aritméticas o las fases de un ciclo de instrucción de la computadora se traslapan en su ejecución el procesamiento de vectores relacionado con los cálculos que implican vectores y matrices grandes. Los procesadores de arquitectura paralela ejecutan cálculos sobre arreglos de datos grandes.

Existen diversas arquitecturas de computadoras en paralelo. Estas se diferencian en cómo se organizan sus procesadores, memoria e interconexiones. Los sistemas más comunes son:

- Procesadores Paralelos Masivos (MPP: Massive Parallel Processors)
- Multiprocesadores Simétricos (SMP: Symmetric Multiprocessors)
- Acceso No Uniforme a la Memoria – Coherencia de Cache (CC-NUMA: Cache-Coherent Nonuniform Memory Access)
- Sistemas Distribuidos (Grids)
- *Clusters*

MPP es un gran sistema de procesamiento paralelo con una arquitectura que típicamente esta formada de varios cientos de elementos de procesamiento que están interconectados a través de una red de alta velocidad. Cada elemento suele disponer de una memoria principal y de uno o más procesadores (aunque incluso pueden disponer de periféricos como unidades de disco). En cada nodo se ejecuta una copia separada del sistema operativo.

Un sistema SMP suele disponer de 2 a 64 procesadores y en su arquitectura todos los elementos son compartidos. En estos sistemas, todos los procesadores comparten todos los recursos disponibles, adicionalmente sólo se ejecuta una copia del sistema operativo.

CC-NUMA es un sistema escalable multiprocesador que dispone de acceso no uniforme a la memoria. Al igual que los sistemas SMP, cada procesador en un sistema CC-NUMA tiene una visión global de la memoria. Este tipo de sistema recibe su nombre (NUMA) debido a que el acceso a la memoria requiere distintos tiempos, según la distancia a la que se encuentra la parte de memoria a la que se accede.

Un Sistema Distribuido (Grid) es una forma de conexión heterogénea entre computadores, donde Cada máquina ejecuta su propio Sistema Operativo. Mientras que las redes convencionales se enfocan en la comunicación entre dispositivos (y personas), la computación en *Grid* gestiona los ciclos y recursos no usados de todos los computadores de la red para resolver problemas que exceden la capacidad de una sola máquina. La computación en *Grid* requiere un *software* especial que es único para cada proyecto. La computación en *Grid* posibilita el hecho de compartir y añadir de una gran variedad de recursos computacionales distribuidos geográficamente: supercomputadores, *Clusters*, sistemas de almacenamiento, fuentes de datos, instrumentos y personas. Presentándose como un único recurso para resolver grandes problemas de computación, modelado molecular de medicamentos, análisis de la actividad cerebral, física de alta energía. En una analogía podemos decir que es como una red eléctrica, donde los generadores de potencia están distribuidos sin que los usuarios sean capaces de distinguir la fuente de energía o su localización.

Un *Cluster* es un conjunto de computadores independientes interconectados por medio de buses o redes, usadas como un recurso unificado de cómputo. A un nivel básico un *Cluster*, también llamado NOW (Network of Workstations) o COW (Cluster of Workstations) es un conjunto de estaciones de trabajo o computadoras que están interconectadas mediante algún tipo de red. Generalmente estas redes son de alta velocidad. La principal característica de un *Cluster* es que trabaja como un conjunto integrado de recursos y dispone de una única imagen del sistema que es compartida por todos sus nodos. Un factor importante que ha hecho que el uso de *Clusters* sea práctico es la estandarización de numerosas herramientas y utilidades usadas en aplicaciones paralelas. Ejemplos de estos estándares son la biblioteca de paso de mensajes MPI (Message Passing Interface), y el lenguaje paralelo HPF (High Performance Fortran). Esta estandarización permite que las

aplicaciones sean desarrolladas y probadas (e incluso ejecutadas) en *Clusters*, y a continuación, en una etapa posterior, puedan ser llevadas, con ligeras modificaciones, a plataformas paralelas especializadas.

Diferencias entre *Grid* y *Cluster*

El objetivo de las *Grids* es la explotación de las sinergias resultantes de la cooperación y capacidad de compartir y sumar la potencia computacional distribuida y ofrecerlas como un único servicio.

En el caso de los *Clusters* la asignación de recursos se realiza gracias a un recurso administrador centralizado y todos los nodos trabajan cooperativamente juntos como un único recurso (como SMP en multiprocesadores). En el caso de las *Grids*, cada nodo tiene su propio recurso administrador y no es un objetivo el proporcionar una vista de sistema único.

Lenguajes de Programación Paralela

MPI (Message Passing Interface). Biblioteca estándar para programación paralela en el modelo de intercambio de mensajes. Esta interfaz intenta establecer un práctico, compacto, eficiente y flexible estándar para el paso de mensajes. En este se han incluido los aspectos más relevantes de otras bibliotecas de programación paralela, como NX 2, P4, entre otras. Entre las ventajas de MPI se encuentra la disponibilidad de varios modos de comunicación, los cuales permiten al programador el uso de *buffers* para el envío rápido de mensajes cortos, la sincronización de procesos o el traslape de procesos de cómputo con procesos de comunicación. Esto último reduce el tiempo de ejecución de un programa paralelo, pero tiene la desventaja de que el programador debe ser más cuidadoso para evitar la corrupción de mensajes. Dos de las principales distribuciones de MPI son: LAM/MPI y MPICH.

PVM (Parallel Virtual Machine). Creado en el verano de 1989 por el Oak Ridge National Laboratory y desarrollado, posteriormente, junto con la Universidad de Tennessee en los Estados Unidos. PVM es una biblioteca de intercambio de mensajes, totalmente libre, capaz de trabajar en redes homogéneas y heterogéneas, que hace uso de los recursos existentes en algún centro de trabajo para poder construir una máquina paralela de bajo costo, obteniendo su mejor rendimiento en "horas muertas", es decir, emplea los recursos libres de cada uno de los nodos sin que el usuario deba preocuparse del cómo, haciéndole creer que estamos ante una única computadora.

PVM maneja transparentemente el seguimiento de todos los mensajes, conversión de datos y programación de tareas a través de una red de arquitectura incompatible. PVM está diseñado para agrupar recursos de cómputo y proveer a los usuarios de una plataforma paralela para ejecutar sus aplicaciones, independientemente del número de computadoras distintas que utilicen y dónde se encuentren localizadas. El modelo computacional de PVM es simple y además muy general. El usuario escribe su aplicación como un conjunto de tareas cooperativas. Las tareas acceden a los recursos de PVM a través de una biblioteca de rutinas. Estas rutinas permiten la inicialización y terminación de tareas a través de la red, así como la comunicación y sincronización entre tareas.

El objetivo de este Trabajo Especial de Grado es cubierto con un conjunto de computadoras heterogéneas en sus características e interconectadas a través de una red *ethernet*, el *software* utilizado "*CFX-5.7*", donde por no tratarse de programación paralela nos brinda la posibilidad de utilizar nuestro sistema como un *Cluster* o como una *Grid*, ya que pueden existir usuarios trabajando sobre algún nodo y el *software* se encarga de gestionar los ciclos del procesador no utilizados.

PROCESAMIENTO PARALELO EN CFX

La implementación del paralelismo en el “*CFX-Solver*” esta basada en el modelo SPMD (Single-Program-Multiple-Data). Este modelo ejecuta versiones idénticas del código en un procesador o varios procesadores.

El procedimiento general de una ejecución paralela se divide en dos pasos: Un primer paso denominado de partición, donde la malla es dividida en un número diferente de segmentos o particiones. Un segundo paso denominado de ejecución, donde los segmentos de la malla son resueltos utilizando procesos separados (uno amo y uno o más procesos esclavos), por lo general en maquinas distintas, con cada proceso trabajando en su propio segmento.

El “*CFX-5.7 Solver*” está diseñado para que todas las tareas numéricas intensivas sean realizadas en paralelo, las tareas administrativas como el control de simulación y la interacción con el usuario, así como las fases de entrada y de salida de la ejecución paralela, son realizadas en modo secuencial por el proceso amo.

Este enfoque garantiza un buen desempeño del paralelismo y escalabilidad del código, al igual que asegura que los archivos de entrada y de salida son como los de una ejecución secuencial.

La comunicación entre los procesos durante una ejecución paralela es realizada usando *PVM* (Parallel Virtual Machine), *MPICH* como biblioteca de paso de mensajes y, sobre IRIX y HP-UX (PARISC e Itanium), están disponibles versiones específicas de *MPI* para estas plataformas.

En todos estos casos, los procesos de una ejecución paralela están distribuidos a lo largo de todos los procesadores. Existen algunas limitaciones para la combinación de *hardware* en una corrida en paralelo.

- *PVM* es completamente operable entre plataformas y puede ser utilizado para trabajos en paralelo sobre una red heterogénea. *PVM* toma en cuenta,

internamente, los diferentes tipos de arquitectura, los ambientes mono o multiprocesador y los conceptos de memoria compartida.

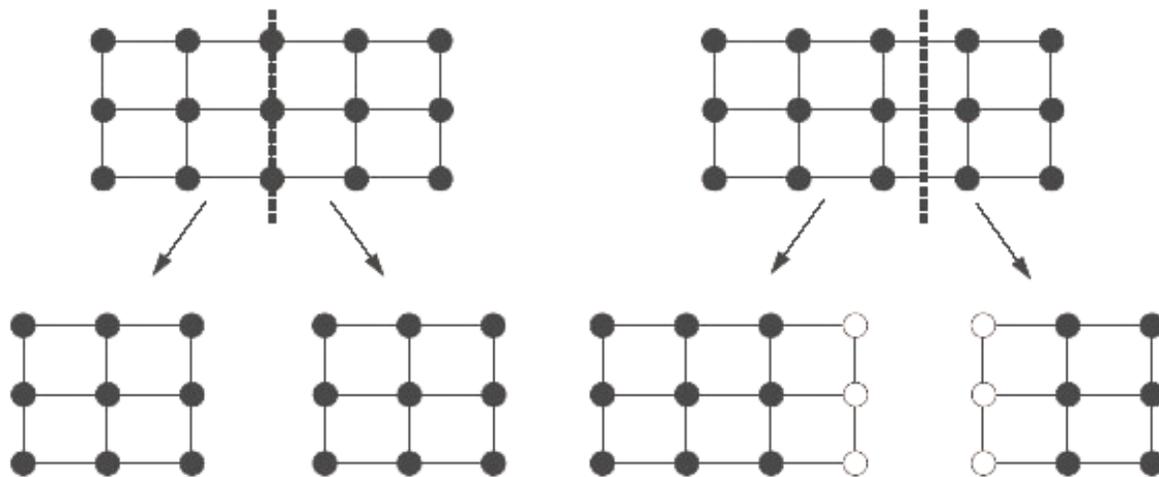
- *MPICH* es operable entre distintos ambientes de UNIX y Linux que son soportados por “*CFX-5.7*”, pero, a diferencia de *PVM*, no puede mezclar las plataformas UNIX o Linux con Windows.
- La implementación sobre la plataforma Windows de *MPICH* puede utilizarse solo sobre redes homogéneas de computadoras.
- Las versiones específicas de *MPI* para plataformas HP-UX e IRIX, deben ser utilizadas en redes homogéneas de estas mismas soportadas por el programa.

Particionamiento

Es el proceso mediante el cual se divide una malla en un número de particiones donde cada una puede ser resuelta en un procesador separado. Se han desarrollado varios métodos de partición, pero la mayoría están basados en la bisección recursiva y difieren sólo en el paso de la bisección.

La malla original es primeramente dividida en dos mallas de igual tamaño aproximadamente. La descomposición es repetida recurrentemente hasta que se obtiene el número requerido de particiones.

Cualquier malla en tres dimensiones puede ser dividida utilizando partición basada en celdas o partición basada en nodos. La partición basada en celdas divide la malla a lo largo de las caras de las celdas sin dividir las a ellas mismas, por ejemplo, en la locación de los nodos. La partición basada en nodos divide la malla a través de las caras de las celdas, por ejemplo, entre las locaciones de los nodos.



1) Partición basada en celdas

2) Partición basada en nodos

Figura 2-1: Tipos de Partición de Mallas

Optimización del particionamiento de la malla

El particionamiento paralelo es un paso de pre-proceso. Utilizando el “*CFX Solver Manager*” se puede particionar una malla de acuerdo con el método de partición y el número de particiones. Se puede seleccionar entre los distintos métodos de partición y crear hasta un máximo de 512 particiones para la simulación.

En general se debe intentar seguir la serie de recomendaciones mostrada a continuación, cuando sea posible:

No realizar pequeñas ejecuciones en paralelo.

Para mallas tetraédricas se recomienda un mínimo de 30000 nodos por partición. Para particiones más pequeñas que esto no se apreciará un incremento significativo en el desempeño y puede que el procesamiento paralelo decaiga.

Para mallas hexaédricas, un buen desempeño en el paralelismo usualmente no se apreciará al menos que se alcance como mínimo un número de 75000 nodos por malla.

Este número depende de la computadora y puede ser más alto o más bajo. Computadoras con doble procesador usualmente dan un pobre desempeño debido a la carencia de ancho de banda en el *bus*. Esencialmente, las computadoras de doble procesador pueden demandar más acceso a la memoria compartida de lo que el *bus* de memoria puede darles.

MPI PARA PROCESAMIENTO PARALELO

MPI esta disponible para sistemas operativos Windows y Linux como una biblioteca de comunicación alternativa para procesamiento paralelo. Versiones nativas de *MPI* están disponibles para maquinas HP y SGI. Para máquinas distribuidas homogéneas y máquinas de multiprocesador, *MPI* ha demostrado tener una eficacia en paralelo mejor sobre las bibliotecas *PVM*. Sin embargo, el desempeño de las tareas con *MPI* no funciona tan confiablemente como *PVM*.

Como utilizar *MPI*

La selección del modo *MPI* se hace al definir el modo de la ejecución en paralelo en el “*CFX Solver-Manager*”.

Las opciones disponibles se encuentran en un menú que depende de la plataforma en que se este ejecutando el programa.

Cuando Utilizar *MPI*

No utilizar el modo de *MPI* para las simulaciones en paralelo en una red. El modo de *PVM* (modo de comunicación paralela por omisión) es superior en términos de la robustez a las situaciones anormales para los funcionamientos de las ejecuciones paralela de la red (ejemplo: una caída del sistema del computador durante una ejecución)

Considere solamente usar *MPI* en las máquinas de multiprocesador (computadoras que contienen dos o más procesadores internos). En este caso determine cuáles de los modos PVM o MPI se ejecuta más rápidamente en la aplicación que este trabajando en específico.

Compruebe que el sistema operativo también tenga bastante "memoria compartida" disponible en segmentos.

Optimizando la ejecución en paralelo utilizando “CFX-Solver”

Para una sola ejecución en paralelo, tratar de utilizar maquinas que tengan las mismas características en nivel y desempeño.

En lo posible valerse de maquinas que puedan realizar sus tareas utilizando su propia memoria física.

Si se utiliza una red de estaciones de trabajo, recurrir a conexiones *ethernet* de alta velocidad, 100 Mbps es preferible en vez de 10 Mbps.

Antes de comenzar una ejecución en paralelo, se debe comprobar que las maquinas seleccionadas pueden ser de uso exclusivo. Si se tiene que compartir el uso con otras aplicaciones esto puede incrementar la carga estática del procesador.

Utilizar dos procesadores en un computador es generalmente mas rápido que utilizar dos procesadores en maquinas diferentes. Las PCs de doble procesador son a menudo la excepción a esto, puesto que el *bus* de la memoria no puede proporcionar el suficiente acceso de memoria para ambos procesadores.

Evitar asignar más de un proceso por procesador.

Utilice un número sensible de particiones. Debe siempre haber un equilibrio entre el tamaño individual de la partición y el número de particiones.

Medición del desempeño en paralelo

En general, existen dos razones por las cuales es deseable realizar procesamiento paralelo en CFX:

Conseguir resultados mas rápido combinando el poder de procesamiento de dos o más procesadores.

Realizar simulaciones que requieren más memoria de la que puede proveer una sola máquina. El funcionamiento de esta característica se mide usando la eficacia de la memoria.

En un ambiente de computadora del mundo real no es siempre fácil medir funcionamiento paralelo. Los tiempos de ejecución medidos dependen de la velocidad relativa de procesadores, que alternadamente es limitada por la arquitectura del procesador así como su carga. Para las redes heterogéneas, el funcionamiento paralelo es determinado directamente por la velocidad del procesador más lento.

La determinación del funcionamiento no puede a veces ser directa debido al hecho de que solamente una parte del funcionamiento de CFX-Solver está realizada realmente en paralelo. La lectura y distribución de los datos del archivo de definición, y el recoger y el escribir de los datos del archivo de los resultados son altamente I/O dependiente y no pueden ser paralelizados. Estas etapas por lo tanto dependen de altas velocidades de disco y de la comunicación rápida de la red para una operación rápida, y se deben descartar en cualquier evaluación de funcionamiento del procesamiento paralelo. El tiempo tomado en la etapa del cálculo del CFX-Solver se puede estimar de la diferencia entre los tiempos en las líneas del archivo de salida:

```
El solver del CFD comenzó: Wed De Oct 28 El 12:10:39 1998
.....
El solver del CFD acabó: Wed De Oct 28 El 16:37:08 1998
```

Eficiencia de Memoria

La eficiencia de memoria,

$$E_m = \frac{M_{s'}}{M_{p'}} \quad (2.3)$$

donde,

$$M_{p'} = \sum_{i=1}^N M_{p',i} \quad (2.4)$$

puede ser utilizada para comparar la memoria total requerida por todos los procesos de un procesamiento paralelo, $M_{p'}$, con la memoria requerida por el procesamiento secuencial, $M_{s'}$. La eficacia de la memoria para CFX-5 será siempre más pequeña de 100%, pero debe generalmente estar en la gama de 80-95% para las mallas con particiones razonables. Con respecto a las estaciones de trabajo en un *Cluster*, es importante saber que todos los procesos (funcionando en ambas PCs amo y esclavo) utilizan una cantidad casi idéntica de memoria.

La información detallada sobre los requisitos de la memoria de un procesamiento paralelo se escribe en el archivo de salida.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento microscópico aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global o macroscópico del fluido.

El movimiento macroscópico del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes porciones del fluido se mueven en forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor.

Como a nivel microscópico se mantiene el movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por dicho movimiento aleatorio y por el movimiento global del fluido. Se acostumbra a utilizar el término convección cuando se hace referencia a este transporte acumulado y el término advección cuando se habla del transporte debido al movimiento macroscópico del fluido.

EL PROBLEMA DE GRAETZ

El problema de determinar las características térmicas de un fluido que entra en una sección calentada a lo largo de un conducto recto se ha estudiado por varios autores para el caso particular de flujo laminar Newtoniano. Cuando el número de Prandtl característico de las propiedades físicas del fluido es mas grande que la unidad, uno puede suponer que las condiciones fluido-dinámicas a la entrada están completamente desarrolladas y entonces es posible derivar las expresiones analíticas para el desarrollo del número de Nusselt y la distribución de temperatura en la sección transversal como en la entrada del fluido en la

región calentada. Este problema ha sido conocido como el "el problema de Graetz" desde que Graetz lo resolvió en 1883 y 1885 para fluidos Newtonianos; después, en 1910, Nusselt independientemente analizó el mismo problema en tal detalle como que algunos textos se refieren a el como "el problema de Graetz-Nusselt".

El número de Graetz es un término adimensional que viene dado por:

$$Gz = \frac{\pi Re Pr}{4 L/D_h} = \frac{\pi D_h^2 V_m \rho C_p}{4 L/D_h} = \frac{\pi D_h^2 V_m}{4 \alpha L} \quad (3.1)$$

Donde:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.2)$$

$$Re = \frac{D_h V_m \rho}{\mu} = \frac{D V_m}{\nu} = \frac{4 \dot{m}}{\pi \mu D_h} \quad (3.3)$$

$$\alpha: \text{Difusividad térmica}; \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3.4)$$

Longitud Dinámica de Entrada

Algunos autores (Feldman *et al.*, 1982a; Shah y Bhatti, 1987) definen la longitud dinámica de entrada con el criterio de que la velocidad máxima sea el 99 % de la velocidad máxima para la condición de flujo monofásico fluidodinamicamente desarrollado. Por otra parte, se puede definir la longitud dinámica de entrada como la distancia axial, medida desde la sección de entrada, requerida para que el factor de fricción local disminuya hasta 1.05 veces su valor para la condición de flujo monofásico fluidodinamicamente desarrollado. La longitud dinámica de entrada para flujo monofásico laminar ($L_{e, \text{lam}}$) queda determinada con:

$$Le_{f_{lam}} \approx 0.05 Re D_h \quad (3.5)$$

Donde Re es el número de Reynolds que viene dado por:

$$Re = \frac{D_h V_m \rho}{\mu} = \frac{D_h V_m}{\nu} \quad (3.6)$$

Siendo V_m la velocidad media del fluido en la sección transversal del conducto anular y ν , ρ y μ , respectivamente, la viscosidad cinemática, la densidad y la viscosidad dinámica del fluido evaluadas a T_m .

Longitud Térmica de Entrada

El desarrollo de la capa límite térmica para flujo interno en un conducto, es análogo al de la capa límite fluidodinámica, y se puede definir la longitud térmica de entrada Le_t como la distancia longitudinal, medida desde la sección donde comienza a transferirse calor hacia o desde el fluido, que se requiere para que el número de Nusselt local Nu_z , disminuya a 1.05 veces del valor correspondiente para la condición de flujo monofásico térmicamente desarrollado (Shah y Bhatti, 1987). Si el calor se transfiere a partir de la sección de entrada, la longitud térmica de entrada para flujo monofásico laminar ($Le_{t_{lam}}$) es:

$$Le_{t_{lam}} \approx 0.05 Re Pr D_h \quad (3.7)$$

Mientras que si el calor comienza a transferirse hacia o desde el fluido, estando ya el flujo monofásico fluidodinámicamente desarrollado, entonces (Mills, 1994):

$$Le_{t_{lam}} \approx 0.017 Re Pr D_h \quad (3.8)$$

Sin embargo, Feldman *et al.* (1982b) afirman tomar "arbitrariamente" como longitud de entrada térmica aquella en la que se cumple que la temperatura adimensional promedio (cociente de diferencias de temperaturas en las que el sustraendo es la temperatura del fluido en la sección de entrada) sea el 99 % de la temperatura adimensional promedio para la condición de flujo monofásico térmicamente desarrollado.

Se denomina región térmica de entrada al tramo de conducto correspondiente a la longitud térmica de entrada. En esta región se manifiestan los denominados efectos térmicos de entrada que son debidos a la condición del flujo en desarrollo térmico. Si la longitud de la región térmica de entrada es significativa frente a la del segmento de conducto en consideración, despreciar tales efectos resultaría en una mala aproximación. Para flujo monofásico laminar; Whitaker (1972) recomienda que se tomen en cuenta los efectos térmicos de entrada si se cumple:

$$\left(\text{Re Pr} \frac{D_h}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \geq 2 \quad (3.9)$$

Donde: L es la longitud del segmento de conducto "medida desde la sección en la que comienza a transferirse calor hacia o desde el fluido", y μ_s es la viscosidad dinámica del fluido evaluada a T_s . (Segura *et al.* 2003)

Influencia de la Temperatura sobre las Propiedades del Fluido

En numerosas aplicaciones se presentan casos de flujo en conductos en los que el tramo de interés está ubicado justamente a continuación de la sección de entrada, por lo que el perfil de velocidad del fluido varía con la distancia axial medida desde dicha sección. A esta condición se le conoce como flujo no desarrollado o en desarrollo. Por otra parte, si el fluido en consideración es petróleo (crudo) o aceite mineral, la viscosidad cinemática (ν) será alta, y por consiguiente el número de Prandtl ($\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$) será alto también, pudiéndose interpretar esta cualidad del fluido como que la difusión de cantidad de movimiento lineal

(momentum) es mayor que la de energía en forma de calor. Adicionalmente, dado que el valor de ν es alto en los casos de interés de este trabajo, el número de Reynolds ($Re_D = \frac{V_m D_h}{\nu}$) que caracteriza el flujo desde el punto de vista dinámico es bajo y menor que el valor crítico de transición, por lo que el flujo es laminar.

Mills (1994) clasifica a los fluidos, de acuerdo a su número de Prandtl, en: metales líquidos ($Pr \ll 1$), gases (y líquidos diferentes a los de las otras dos categorías) ($Pr \sim 1$) y aceites (incluidos los diferentes tipos de crudo) ($Pr \gg 1$). Este trabajo se enfoca en estos últimos, que para el intervalo de temperatura de interés, la variación de las propiedades termofísicas es la siguiente:

- +/- 5 % para la densidad (ρ)
- +/- 5 % para la conductividad térmica (k),
- +/- 15 % para el calor específico a presión constante (C_p)
- +/- 15 % para la difusividad térmica (α)

Las cuatro propiedades anteriores tienen comportamientos cuasi-lineales con la temperatura (López y Ponce, 2005)

- +/- 99 % para la viscosidad cinemática (ν)
- +/- 99 % para la viscosidad dinámica (μ)
- +/- 99 % para el número de Prandtl Pr

Éstas otras tres propiedades son no-lineales (en alto grado) con la variación de T (Ávila y Martínez, 1998).

Con relación a su comportamiento reológico, los hidrocarburos de interés en este trabajo pueden considerarse fluidos newtonianos que se caracterizan porque su viscosidad cinemática es alta y varía significativamente con la temperatura. Según la ecuación de Wright (ASTM, 2000), la función de ν con la temperatura es:

$$\nu = a_1 10^{(b_1 + c_1 \log T)} + d_1 \quad (3.10)$$

donde a_1 , b_1 , c_1 y d_1 son constantes positivas que dependen del sistema de unidades utilizado y del hidrocarburo que se está considerando. Dado que $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$, lo dicho anteriormente para ν también se aplica a Pr , es decir, desde el punto de vista de su comportamiento térmico, los hidrocarburos en consideración se caracterizan porque su número de Prandtl es alto y varía significativamente con la temperatura.

Conservación de Masa:

Considere un caudal con una velocidad \vec{V} en un sistema en los instantes t y $t + \Delta t$ y velocidad \vec{V}_A de el elemento de área dA . La variación de masa del sistema viene dada por la ecuación:

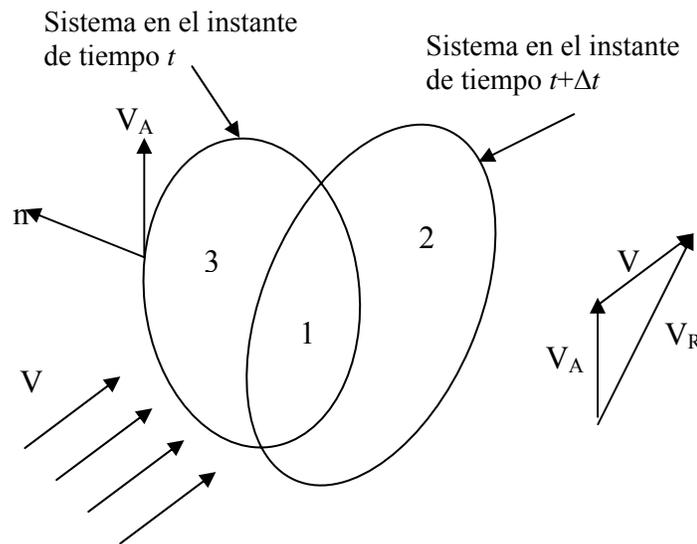


Figura 3-1: Volumen de Control

$$m_1(t + \Delta t) + m_2(t + \Delta t) - m_1(t) - m_3(t) = \Delta m|_{sist.} \quad (3.11)$$

dividiendo por Δt y reorganizando la ecuación se obtiene

$$\frac{m_3(t)}{\Delta t} - \frac{m_2(t+\Delta t)}{\Delta t} + \frac{\Delta m}{\Delta t} \Big|_{sist.} = \frac{m_1(t+\Delta t) - m_1(t)}{\Delta t} \quad (3.12)$$

$$\dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale} + \frac{\Delta m}{\Delta t} \Big|_{sist.} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \Big|_{V.C.} \quad (3.13)$$

Considerando un flujo permanente e incompresible y estado estable, la variación de masa en el sistema será nula y reescribiendo la ecuación se obtiene

$$\dot{m}_{entra} = \dot{m}_{sale} \quad (3.14)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.15)$$

$$\rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.16)$$

Conservación en Cantidad de Movimiento:

Considere un caudal con una velocidad \vec{V} en un sistema en los instantes t y $t + \Delta t$ y velocidad \vec{V}_i para cada elemento infinitesimal de partícula que compone el caudal, llámese m_i . La variación de la cantidad de movimiento del sistema viene dada por la ecuación:

$$m_1 \vec{V}_1(t + \Delta t) + m_2 \vec{V}_2(t + \Delta t) - m_3 \vec{V}_3(t) - m_4 \vec{V}_4(t) = \Delta(mV) \Big|_{sist.} \quad (3.17)$$

Dividiendo por un tiempo infinitesimal Δt

$$\frac{m_1 \vec{V}_1(t + \Delta t) - m_1 \vec{V}_1(t)}{\Delta t} + \frac{m_2 \vec{V}_2(t + \Delta t)}{\Delta t} - \frac{m_3 \vec{V}_3(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta(mV)}{\Delta t} \Big|_{sist.} \quad (3.18)$$

Aplicando la Segunda Ley de Newton para sistemas:

$$\frac{\Delta(m\bar{V})}{\Delta t} = \sum \bar{F} \quad (3.19)$$

Al sustituir en la ecuación, esta queda de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta}{\Delta t}(m\bar{V})_{v.c.} = \sum \bar{F} + m\bar{V}|_{entra} - m\bar{V}|_{sale} \quad (3.20)$$

Al observar el fenómeno físico del movimiento de un elemento de un flujo másico, se puede inferir que el mismo no solo transporta velocidad, sino que este transporta energía, energía cinética turbulenta, disipación de energía cinética turbulenta, especies químicas, etc. Por lo tanto se puede expresar, de una forma genérica, la ecuación de transporte de energía asociada a un elemento del flujo másico por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta}{\Delta t}(m\phi)_{v.c.} = \dot{g}^\phi \Delta\bar{V} + m\phi|_{entra} - m\phi|_{sale} \quad (3.21)$$

donde el término \dot{g}^ϕ es obtenido de la Ley de Conservación de la propiedad a considerar en el sistema.

Conservación de Energía:

Para un sistema donde predomina la energía cinética y la energía interna y considerando los intervalos de tiempo t y $t + \Delta t$ se obtiene la ecuación

$$E_1(t + \Delta t) + E_2(t + \Delta t) - E_1(t) - E_2(t) = \Delta E|_{sist.} \quad (3.23)$$

Aplicando la 1^{ra} Ley de la Termodinámica y simplificando se obtiene

$$\frac{\Delta E}{\Delta t}|_{v.c.} = \dot{Q}_{entra} - \dot{W}_{sale} + \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} \quad (3.24)$$

Discretización Numérica

Las soluciones analíticas de las ecuaciones de Navier Stokes existen solamente para simplificar los fluidos bajo condiciones ideales. Para obtener las soluciones de problemas reales se deben adoptar aproximaciones numéricas en las ecuaciones y reemplazar las aproximaciones algebraicas por métodos numéricos.

Discretización de las Ecuaciones de Conservación

Para aproximar un dominio espacial, se discretiza dentro de un volumen de control finito y se utiliza una malla. Las ecuaciones de conservación son integradas dentro de cada volumen de control, tal que cada cantidad relevante (masa, momentum y energía) se conserva en cada volumen de control.

La figura que se muestra a continuación es una malla típica por unidad de profundidad (por ésta razón se considerará como bidimensional); cada una de las superficies del volumen de control es representada por el área sombreada.

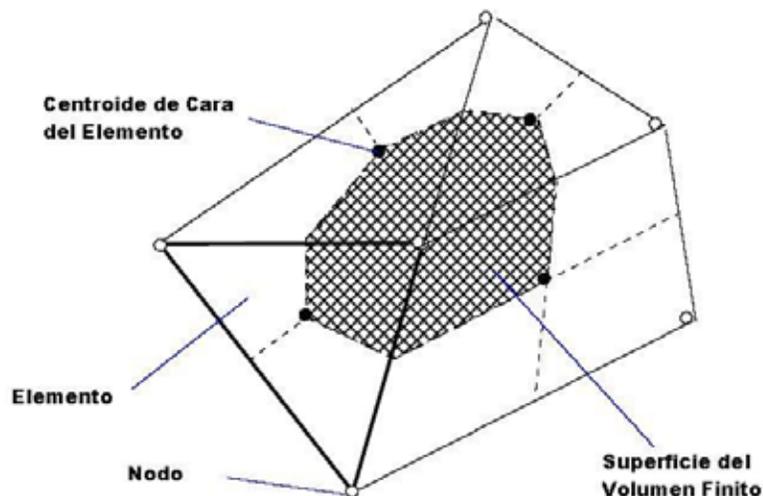


Figura 3-2: Volumen Finito basado en Elemento

Es claro que cada nodo se encuentra rodeado por un conjunto de superficies que encierran un volumen finito. Todas las soluciones posibles y las propiedades del fluido son representadas por el nodo.

Considerando las ecuaciones de Continuidad, de Momentum y de Energía expresadas en coordenadas cartesianas y considerando:

- Estado permanente
- Flujo incompresible
- Fluido Newtoniano
- Flujo laminar
- Se desprecia la fricción viscosa en la ecuación de Energía

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j) = 0 \quad (3.25)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_j \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (3.26)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_j U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right) \quad (3.27)$$

Donde U_j representa la componente de la velocidad en una dirección. Estas ecuaciones se pueden integrar sobre un volumen de control fijo empleando el Teorema de la divergencia de Gauss para convertir una integral de volumen en una integral de superficie, transformándose las ecuaciones de la siguiente manera:

$$\rho \int_s U_j dn_j = 0 \quad (3.28)$$

$$\rho \int_s U_j U_i dn_j = -\int_s P dn_j + \int_s \mu_j \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_v S_{U_i} dv \quad (3.29)$$

$$\rho \int_s U_j T dn_j = \frac{\partial}{\partial x_j} \int_s \frac{k}{c_p} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) dn_j \quad (3.30)$$

Donde v y s son el volumen y la superficie a integrar respectivamente y dn_j es el diferencial del vector en su componente cartesiana normal a la superficie. Las superficies integradas son la integración de los flujos donde se representa el volumen integral que acumula los términos en cuestión.

El primer paso para resolver estas ecuaciones numéricas continuas es la aproximación usando funciones discretas. Ahora consideremos una malla de un elemento aislado como el que se muestra en la figura siguiente:

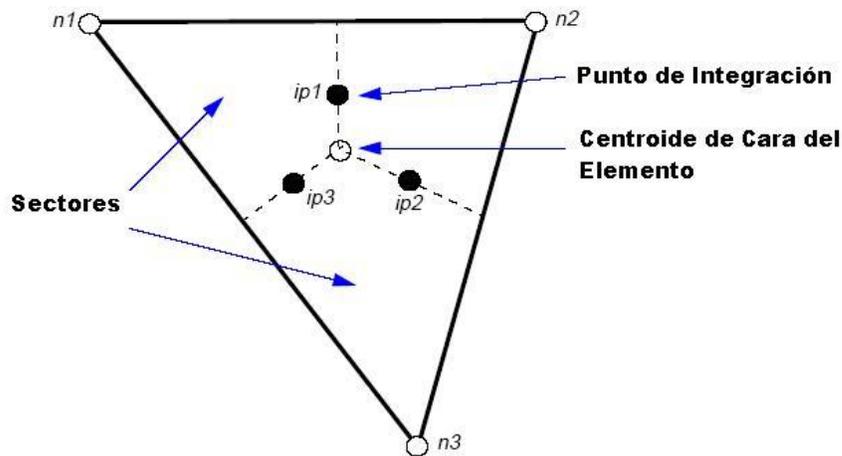


Figura 3-3: Elemento de malla

Las superficies discretizadas por la cual atraviesa el flujo son representadas por puntos que al integrarlos están dentro de la ecuación continua en su forma discretizada. Los puntos ip_n se encuentran localizados en el centroide de cada segmento de superficie de un elemento tridimensional que se encuentra envuelto en un volumen finito.

La discretización que proviene de la ecuación integral resulta en:

$$\rho \sum_{ip} (U_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (3.31)$$

$$\sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (p \Delta n_j)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_j \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{U_i}} V \quad (3.32)$$

$$\sum_{ip} \dot{m}_{ip} T_{ip} = \sum_{ip} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} \quad (3.33)$$

donde V es el volumen de control, el subíndice ip denota el punto a integrar, la sumatoria es sobre todos los puntos del volumen finito, Δn es el vector normal a la superficie discreta, Δt es el instante de tiempo y el flujo másico es $\dot{m}_{ip} = (\rho u_j \Delta n_j)_{ip}$

Método “conservativo” de Volúmenes Finitos basado en Elementos

Éste método consiste en delimitar las caras del volumen por los planos medios de los Elementos, método celda-vértice (cell-vertex method), de manera tal que el volumen encerrado sea de menor volumen que la suma de las partes de todos los elementos que lo delimitan. Las superficies del volumen finito son atravesadas por un flujo el cual puede ser representado por una integración de puntos discretos los cuales pertenecen al dominio de las ecuaciones discretas a estudiar.

Solución analítica para flujo desarrollado

El paso de un fluido a través de un conducto anular es un problema de gran interés en la transferencia de caloría que dicha configuración permite la aplicación de distintas temperaturas en las superficies del conducto anular. Algunos casos de interés son el conducto plano ($r^* = 1$) y el conducto circular con un núcleo infinitesimal en su centro ($r^* = 0$).

Cabe destacar que al estudiar la presencia del núcleo infinitesimal en el centro, los resultados que se obtienen son idénticos a los resultados obtenidos sin la presencia de éste núcleo.

La nomenclatura a utilizar en el presente trabajo para el estudio del flujo anular será la mostrada en la figura siguiente:

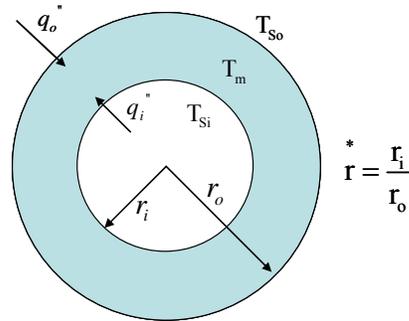


Figura 3-4: Sección anular transversal

Distribución de Velocidad

El perfil de velocidad para flujo totalmente desarrollado en conductos concéntricos de sección anular viene dado por la ecuación (Kays y Crawford, 1980):

$$u = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{dz} \right) r_o^2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 + 2r_m^{*2} \ln \left(\frac{r}{r_o} \right) \right] \quad (3.34)$$

$$u_m = \frac{1}{8\mu} \left(\frac{dp}{dz} \right) r_o^2 \left(1 + r^{*2} - 2r_m^{*2} \right) \quad (3.35)$$

$$\frac{u_{\max}}{u_m} = \frac{\left(1 - r_m^{*2} + 2r_m^{*2} \ln r_m^* \right)}{1 + r^{*2} - 2r_m^{*2}} \quad (3.36)$$

donde r_m es el radio donde la velocidad es máxima

$$r_m^* = \frac{r_m}{r_o} = \frac{\sqrt{1 - r_m^{*2}}}{2 \ln \left(\frac{1}{r} \right)} \quad (3.37)$$

Lundgren, *et al.* (Kays y Perkins, 1985) calculó la velocidad completamente desarrollada para el flujo dentro de cilindros concéntricos de sección anular como:

$$\frac{u_{\max}}{u_m} = 2 \frac{\left(r_o^2 - r_m^2 - 2 r_m^* \ln r_m^* \right)}{r_o^2 + r_m^2 - 2 r_m^{*2}} \quad (3.38)$$

$$r_m^2 = \frac{r_o^2 - r_m^2}{2 \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)} \quad (3.39)$$

El coeficiente de fricción para un flujo laminar será calculado por la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.40)$$

El gradiente de presión para el flujo laminar será despejado de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\frac{dp}{dz} = f \frac{\rho}{D_h} \frac{(V_m)^2}{2g} \quad (3.41)$$

Para el cálculo de μ se utilizará el promedio aritmético de los valores para el rango de temperatura $293,15K \leq T \leq 353,15K$

Propiedades TermoFísicas del P22

Las ecuaciones de las propiedades dependientes de la temperatura fueron obtenidas por Segura y se expresan por medio de las siguientes expresiones:

$$\rho = 1042.2000 - 0,6048 * T \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (3.42)$$

$$\nu = \left(10^{10(7,7921-3,0665 \text{Log}T)} - 0,7 \right) * 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (3.43)$$

$$k = 0,1779 - 1,0058 * 10^{-4} * T \left[\frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right] \quad (3.44)$$

$$C_p = 653,64 + 4,2884 * T \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg.}^\circ\text{K}} \right] \quad (3.45)$$

$$\mu = \nu * \rho \text{ [Pa.s]} \quad (3.46)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (3.47)$$

Algoritmo de Solución empleado por CFX-5

“*CFX-5.7*” usa un algoritmo de solución, donde el cálculo de las ecuaciones fluidodinámicas (para u, v, w y p) se hace como un único sistema. Ésta aproximación de la solución utiliza una gran discretización implícita de las ecuaciones a todos los tiempos de ejecución de cada iteración. Para los problemas de estado permanente, el tiempo de iteración se comporta como un parámetro de aceleración, para guiar la solución aproximada a una solución básicamente física real del estado permanente. De esta manera se reduce el

número de iteraciones requeridas para la convergencia. El esquema del algoritmo se presenta en la siguiente figura:

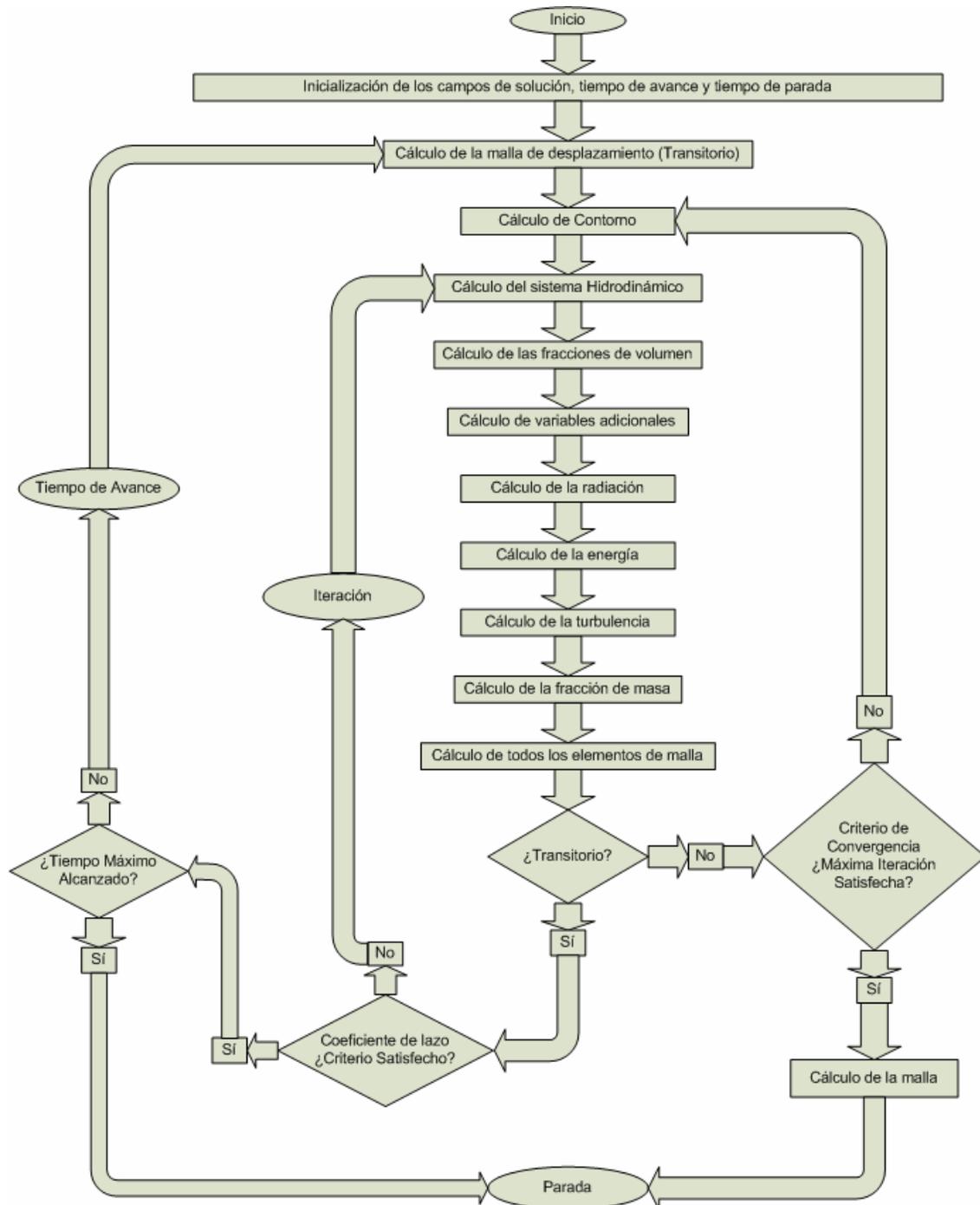


Figura 3-5: Algoritmo de Solución

CAPÍTULO 4

SISTEMA COMPUTACIONAL

La plataforma computacional que se requiere para realizar las simulaciones objeto de este Trabajo Especial, incluidas visualizaciones y animaciones, necesita de la infraestructura adecuada (espacio físico, mobiliarios y conexiones de red). Tales requerimientos contribuirán a un funcionamiento óptimo de la misma. Por tal motivo se realizó la identificación de requerimientos-disponibilidades, con el objetivo de seleccionar y especificar el local y mobiliario existente en la EIM de la U.C.V. los cuales fueron proporcionados por la Dirección de la E.I.M. (Profesor Ferrer César) para el desarrollo de este trabajo.

El local debía contar con el espacio físico suficiente para albergar por lo menos a las nueve computadoras que en un principio formarían la plataforma junto con los equipos periféricos de rigor impresora, escáner (scanner), etc., además de sus usuarios tesistas de pre y post grado. Adicionalmente debía cubrir los aspectos de iluminación, confort térmico y acústico, seguridad y accesibilidad.

Se realizó la revisión de estos espacios dentro de los cuales se encontraban la sala de computación de postgrado ubicada en la planta alta de la EIM y la sala destinada a simulaciones bajo ambiente CAD, ubicada en la planta baja de dicha escuela.

Se tomó la decisión de configurar la plataforma computacional en la sala de la planta baja llamada desde entonces Sala de Tesistas, debido a que la misma dispone de para el momento las características idóneas de espacio y mobiliario necesario. La misma contaba, al momento de tomar ésta decisión, con la cantidad de mesas disponibles, un cableado interno con ocho puntos de red y 8 computadoras personales totalmente operativas con las siguientes principales características: microprocesador INTEL® Pentium® III de 500 MHz, memoria RAM: 128 MB, disco duro (hard disk): 6 GB, unidad de discos compactos (CD-ROM's) de 52X, unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44

MB, tarjeta de vídeo de 32 MB, monitor de 17", teclado, ratón de 3 (tres) botones y una computadora inoperativa debido a la falta de componentes internos y averías importantes tales como procesador, fuente de poder, disco duro y memoria

Una de las computadoras operativas ofrecidas por el Director de la EIM se encuentra en el laboratorio de fotoeslasticidad ya que la misma fue cedida en calidad de préstamo por el profesor Reyes Orlando a la profesora Goudiel Elena

Dentro de los objetivos se tenía previsto incluir la estación de trabajo en desuso ubicada en la sala de post grado dentro de la plataforma computacional, ofrecida por el Coordinador del Post-grado de la EIM (Profesor Martínez Manuel), marca: Silicon Graphics, modelo O2, sistema de arquitectura de memoria uniforme (UMA), con las siguientes características principales: microprocesador MIPS® R5000™ de 180 MHz, memoria RAM: 256 MB, disco duro (hard disk): 4 GB, unidad de discos compactos (CD-ROM's) de 20X, módulo de audio/video, monitor de 17", teclado, ratón de 3 (tres) botones que no pudo completarse debido al hurto de la misma.

Para completar la plataforma se incluyen seis computadoras personales nuevas, proporcionadas por el Director de la EIM (Ferrer César), con las siguientes características: microprocesador INTEL® Pentium® IV de 1,6 GHz, memoria RAM: 256 MB, disco duro (hard disk): 40 GB, unidad de discos compactos (CD-ROM's) de 52X, unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB, tarjeta de vídeo de 32 MB, monitor de 15", teclado, ratón de 3 (tres) botones.

Posteriormente se adquirieron tres módulos de memorias RAM de 512 MB para aumentar la capacidad de tres de las computadoras Pentium® IV de 1.6 GHz a 768MB de memoria RAM

La construcción de esta plataforma se logra al realizar la configuración de una Red de Area Local (LAN: Local Area Network). Para ello se crearon 8 puntos nuevos de red, de la misma categoría de los puntos existentes en la sala (UTP Cat. 5), esto debido a que se disponía en la EIM de una cantidad suficiente del cable antes mencionado (UTP Cat. 5). Esto nos permite una conexión a 10/100 Mbps que cumple con los requerimientos del

software CFX-5. Para alcanzar este propósito se adquirió un *switch ethernet* 10/100 Mbps de dieciséis puntos, que permitió la culminación de la red con las doce computadoras interconectadas entre sí.

La configuración de cada una de las computadoras que pertenecen a la red es la siguiente:

Nombre: “**luna**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Tarjeta de red Ethernet 10/100 Mbps (conexión red externa).
- Direcciones IP: 150.185.85.130
- Tarjeta de red Ethernet 10/100 Mbps (conexión red satélites).
- Direcciones IP: 172.17.64.254
- Sistema Operativo: Red Hat Linux Advance Server 3.0
- Descripción: Servidor de Archivos.
- Procesador: INTEL® Pentium® IV de 1,7 GHz
- Memoria RAM: 768 MB
- Disco duro (hard disk): 40 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM's) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 17"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**fobos**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.102
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional / Red Hat Linux 9.0
- Descripción: Servidor de Licencia / Nodo Amo / Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® IV de 1,7 GHz
- Memoria RAM: 768 MB
- Disco duro (hard disk): 40 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM's) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 17"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**deimos**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.103
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional / Red Hat Linux 9.0
- Descripción: Nodo Esclavo / Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® IV de 1,7 GHz
- Memoria RAM: 768 MB
- Disco duro (hard disk): 40 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM's) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 17"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: **“io”**

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.104
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional / Red Hat Linux 9.0
- Descripción: Nodo Esclavo / Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® IV de 1,7 GHz
- Memoria RAM: 256 MB
- Disco duro (hard disk): 40 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 17"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: **“europa”**

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.105
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional / Red Hat Linux 9.0
- Descripción: Nodo Esclavo / Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® IV de 1,7 GHz
- Memoria RAM: 256 MB
- Disco duro (hard disk): 40 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 17"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**ganimedes**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.106
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional / Red Hat Linux 9.0
- Descripción: Nodo Esclavo / Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® IV de 1,7 GHz
- Memoria RAM: 256 MB
- Disco duro (hard disk): 40 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos compactos (CD-RW) de 52X32X52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 17"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**calisto**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.107
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional
- Descripción: Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® III de 500 MHz
- Memoria RAM: 128 MB
- Disco duro (hard disk): 9,3 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 15"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**amaltea**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.108
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional
- Descripción: Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® III de 500 MHz
- Memoria RAM: 128 MB
- Disco duro (hard disk): 9,3 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 15"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**titan**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.109
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional
- Descripción: Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® III de 500 MHz
- Memoria RAM: 128 MB
- Disco duro (hard disk): 9,3 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 15"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**japetus**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.110
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional
- Descripción: Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® III de 500 MHz
- Memoria RAM: 128 MB
- Disco duro (hard disk): 9,3 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 15"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**rea**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.111
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional
- Descripción: Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® III de 500 MHz
- Memoria RAM: 128 MB
- Disco duro (hard disk): 9,3 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 15"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Nombre: “**tethys**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Dirección IP: 172.17.64.112
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional
- Descripción: Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® III de 500 MHz
- Memoria RAM: 128 MB
- Disco duro (hard disk): 9,3 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM's) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 15"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Dentro de las instalaciones de la Sala de Tesistas se encuentra la computadora nombrada “dione”, sin embargo dicha computadora no pertenece a la red por carecer de tarjeta de red. Cabe destacar que la misma presentaba tarjeta de red la cual fue removida e insertada en la computadora “luna” para la interfaz con las redes externas. Las características de ésta computadora se presenta a continuación:

Nombre: “**dione**”

- Grupo de Trabajo: “satelites”
- Sistema Operativo: Windows XP Profesional
- Descripción: Estación de trabajo
- Procesador: INTEL® Pentium® III de 500 MHz
- Memoria RAM: 128 MB
- Disco duro (hard disk): 4,0 GB,
- Unidad de discos compactos (CD-ROM’s) de 52X
- Unidad de discos flexibles (floppy disks) de 3,5" y 1,44 MB
- Tarjeta de vídeo de 32 MB
- Monitor de 15"
- Teclado, ratón de 3 (tres) botones

Se instaló el *software* “**CFX-5.7**” otorgado por la Coordinación de Proyectos del IMF (Profesores García Reinaldo y Saavedra Iván), para procesamiento en paralelo en las cinco computadoras personales nuevas (“fobos”, “deimos”, “io”, “europa” y “ganimedes”), ofrecidas por el Director de la E.I.M. La computadora “luna” se fijó como “servidor de archivos”, esto con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a sus archivos desde cualquiera de las otras once (11) computadoras que conforman la red. En las seis restantes no se llevó a cabo dicha instalación debido a que dentro de las exigencias del CFX-5 se indica que es necesario un mínimo de 256 MB de memoria RAM para ejecutarlo.

Adicionalmente para cumplir con los requerimientos exigidos por el *software* “*CFX-5.7*” para el Procesamiento Paralelo se habilitaron en las computadoras “luna”, “fobos”, “deimos”, “io”, “europa” y “ganimedes” los siguientes servicios:

- Servicio de Nombres Internet (NIS: Name Internet Services)
- Sistema de Fichero de Red (NFS: Network File System)
- Cuerpo Remoto (rsh: Remote Shell)
- Samba (SMB)

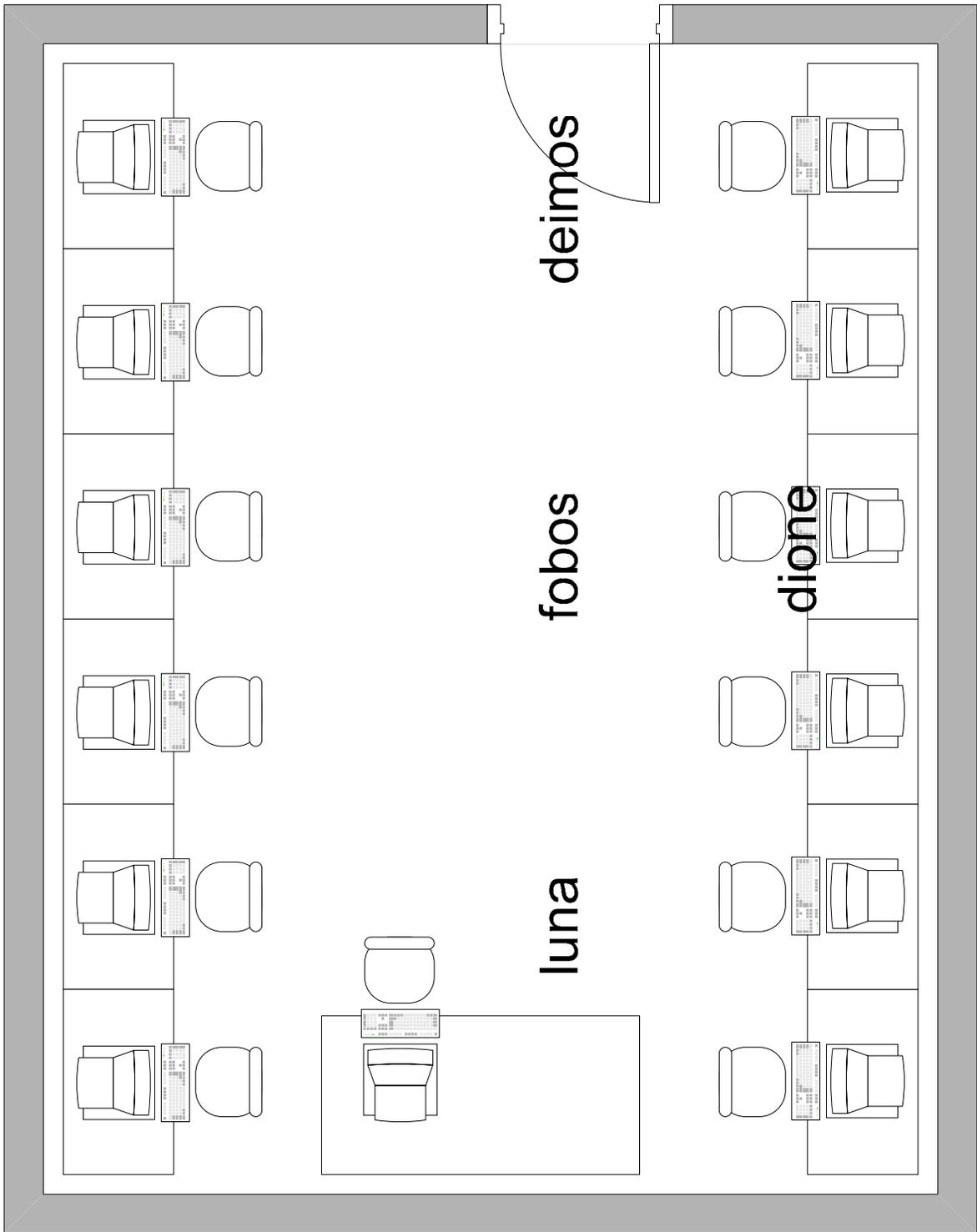


Figura 4-1: Distribución en Planta de la Sala de Tesistas

CAPÍTULO 5

SIMULACIONES NUMÉRICAS

Los resultados de las simulaciones se lograron utilizando los módulos “*CFX-5.7 Solver*” y “*CFX-5.7 Post*” los cuales permiten realizar las iteraciones y obtener las gráficas de los parámetros de estudio así como las animaciones gráficas.

Se presentan gráficas de las temperaturas y de los perfiles de velocidades para su análisis, lo que permite una interpretación del fenómeno de transferencia de calor y su influencia sobre el perfil de velocidad de un modo sencillo.

Se puntualizan parámetros computacionales, tales como tiempo de ejecución de las iteraciones y utilización de memoria para cada uno de los casos, tanto en procesamiento paralelo como procesamiento secuencial. Dichos resultados se muestran en gráficas de barras para una comparación sencilla y global.

Comparación de los resultados:

En la comparación de los resultados se ha seleccionado para el cálculo de la viscosidad cinemática de la solución analítica, el valor promedio aritmético para el rango de temperatura de estudio, dando un valor de:

$$\mu_{\text{prom}} = 0.01751344 \text{Pa.s}$$

El gradiente de presión se calculó para una longitud igual a dos metros lineales ($L = 2\text{m}$).

A continuación se presentan los casos estudiados con las condiciones de borde y las condiciones fluidodinámicas así como los resultados antes comentados:

Caso 1:

Datos de la región de entrada:

$$T_i = 293,15\text{K}$$

$$\text{Re} = 100$$

$$v_i = 4,77904 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho_i = 864,9209 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$D_h = \frac{4A_a}{P}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

$$\frac{D_i}{D_o} = 0,5$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} \left(D_o^2 - \frac{D_o^2}{4} \right) = \frac{3\pi D_o^2}{16}$$

$$P = \pi(D_o + D_i) = \frac{3\pi D_o}{2}$$

$$D_h = \frac{D_o}{2} = 0,0381\text{m}$$

$$\text{Re} = \frac{V_m D_o}{\nu} \Rightarrow V_m = \frac{\text{Re} \cdot \nu}{D_o}$$

$$V_m = \frac{100 * 4,77904 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{0,0381\text{m}} = 0,0543 \text{ m}/\text{s}$$

$$\dot{m} = \rho_i * V_m * A_a = 0,1265 \text{ kg}/\text{s}$$

Gradiente de presión:

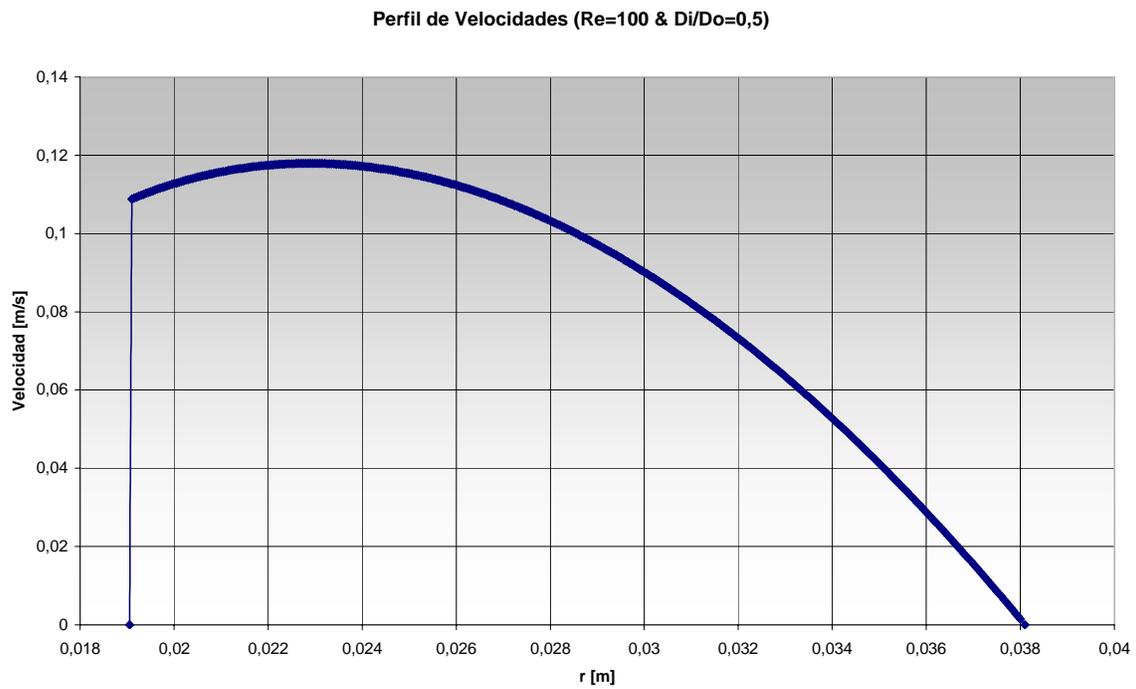
$$\frac{dp}{dz} = \frac{64}{100} \frac{(0,1254\text{m})^2}{2 * 0,0381\text{m}} 846,7589 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 111,8964 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Los Valores obtenidos con la solución analítica y con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” para la velocidad media y la velocidad máxima se presentan en la siguiente tabla:

	Vmax [m s ⁻¹]	Vm [m s ⁻¹]
Solución Analítica	0,1179	0,1148
Solución CFX	0,1018	0,1835

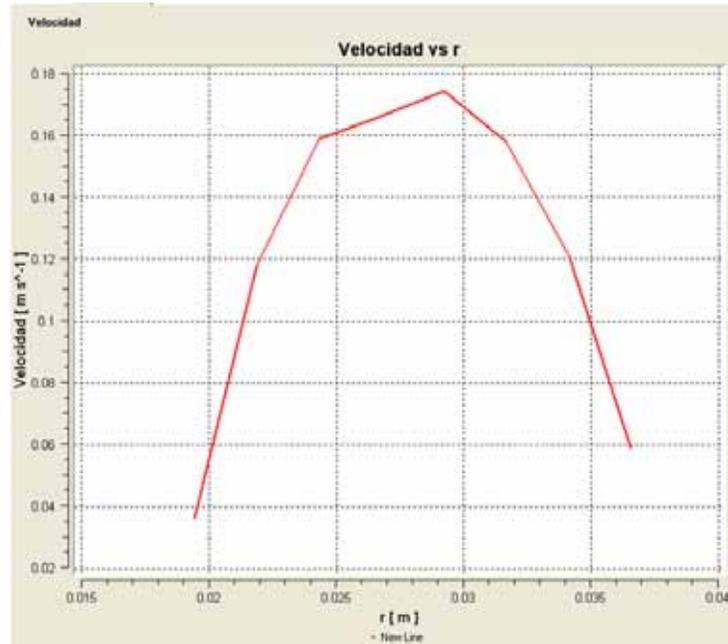
Tabla 5-1

La gráfica del perfil de velocidad obtenido con la solución analítica se presenta a continuación:

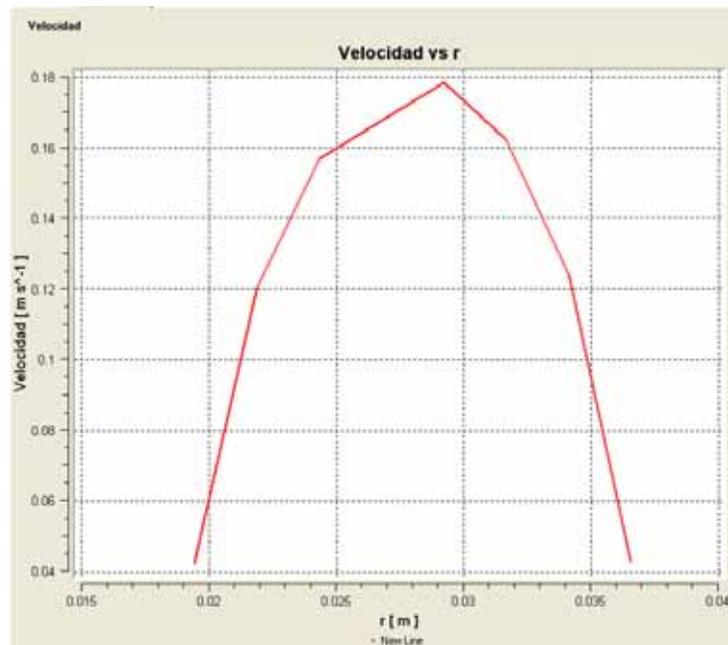


Las gráficas obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post* de los perfiles de velocidad obtenidos con el módulo “*CFX-5.7 Solse* presentan a continuación:

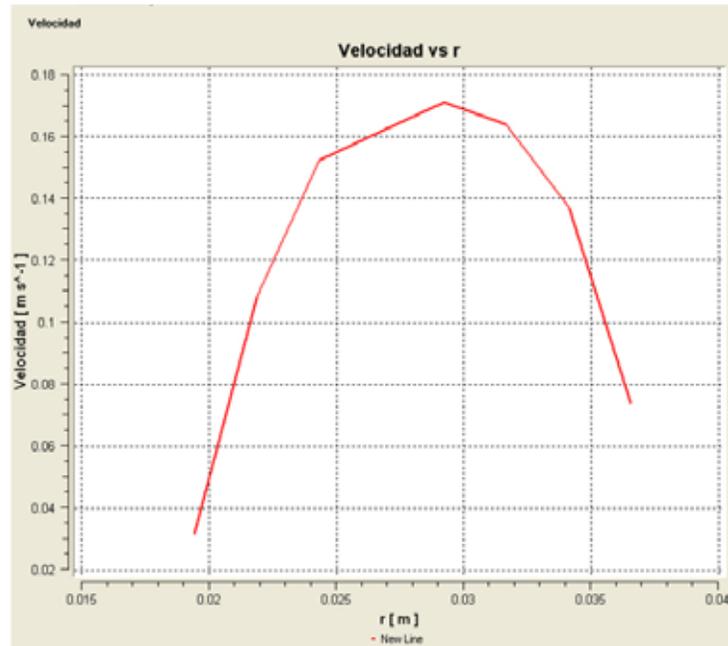
Z=0,10m



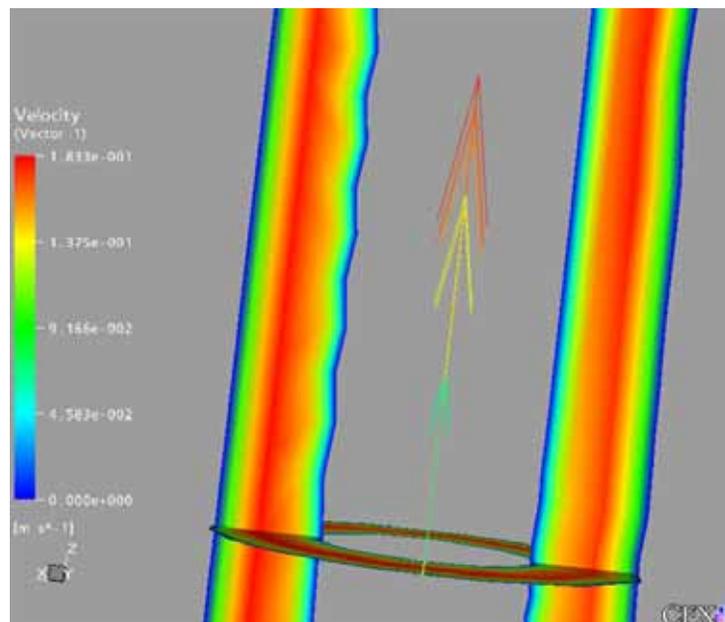
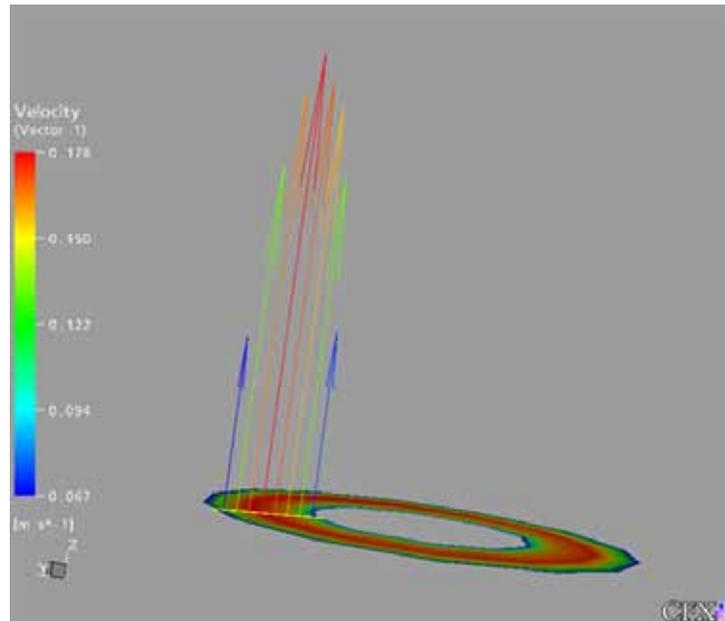
Z=1,00m



Z=1,90m

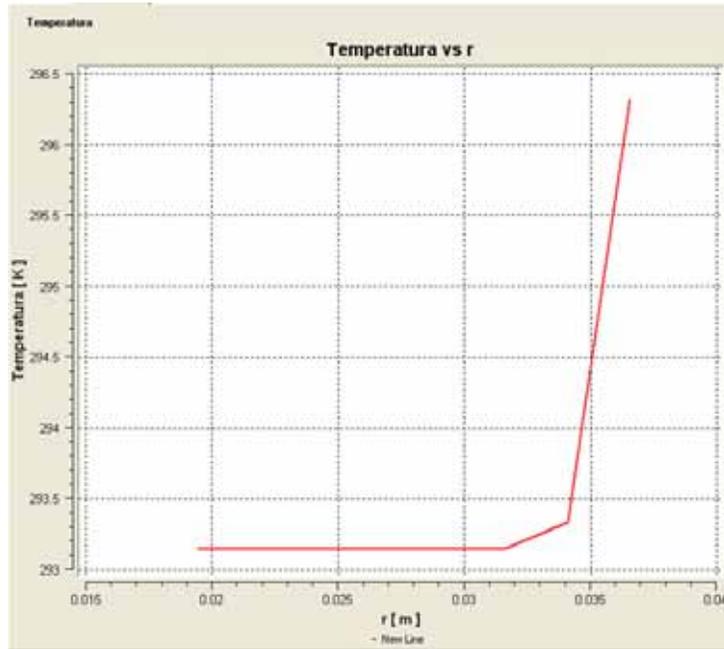


Las representaciones gráficas de los perfiles de velocidad obtenidas por el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:

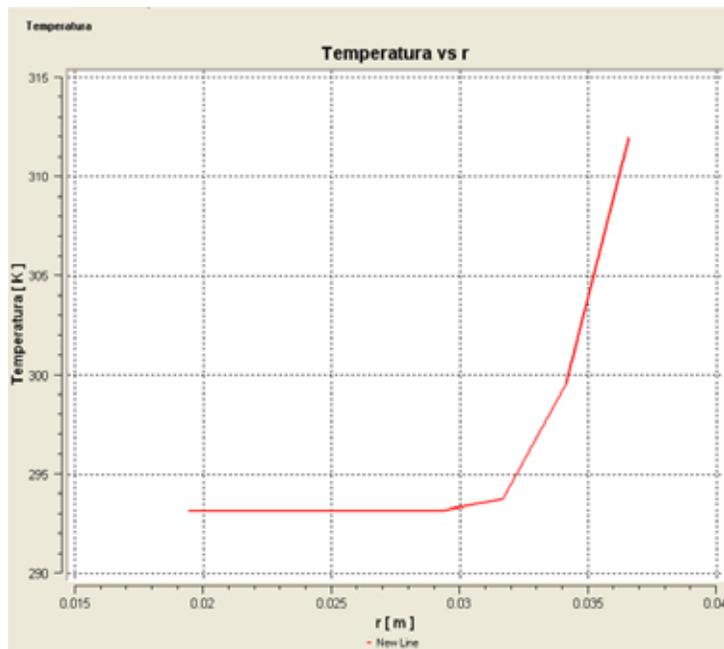


Las gráficas de los perfiles de temperatura obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:

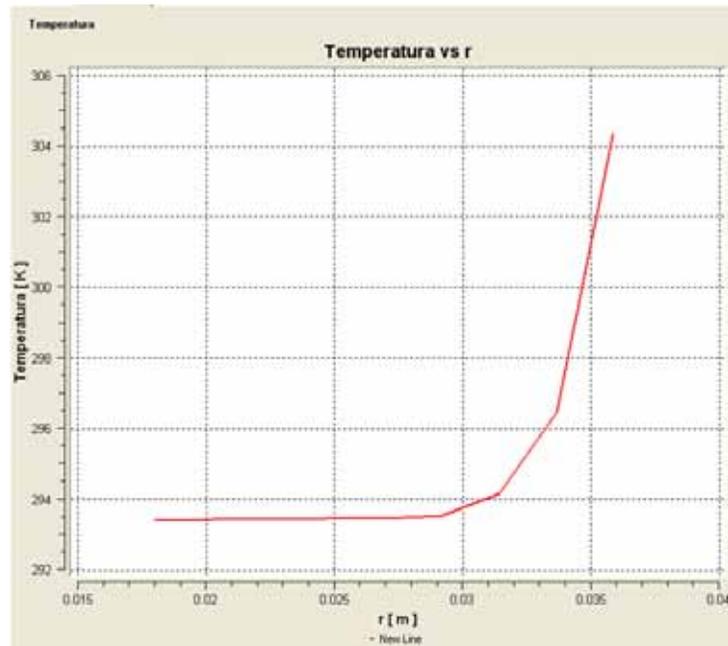
Z=0,10m



Z=1,00m

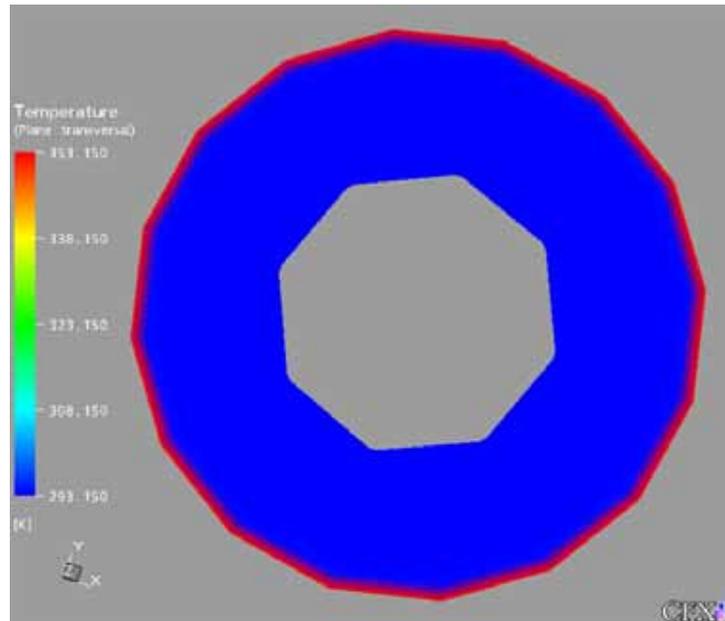


Z=1,90m

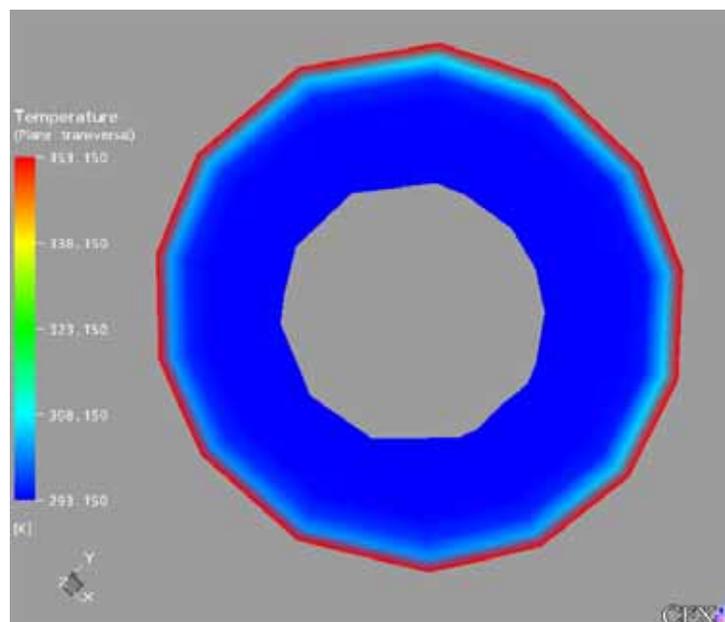


Las representaciones gráficas de los planos transversales de temperatura obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:

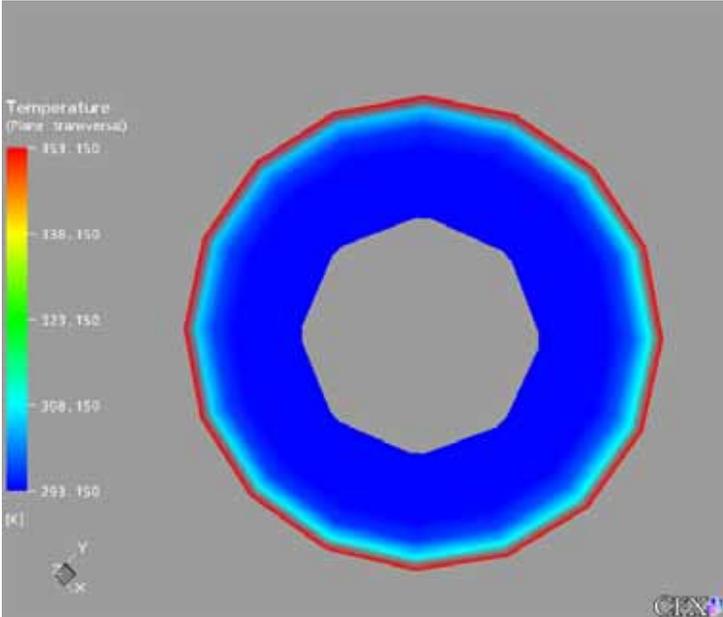
Z=0,01m



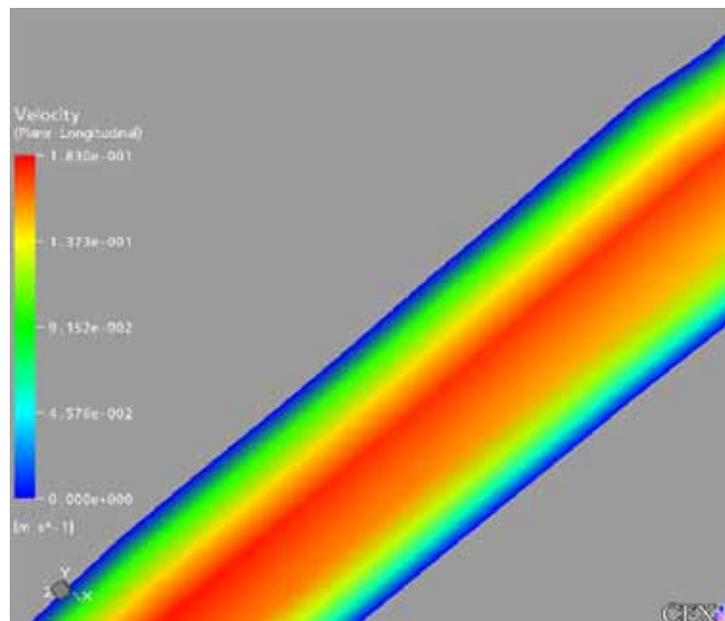
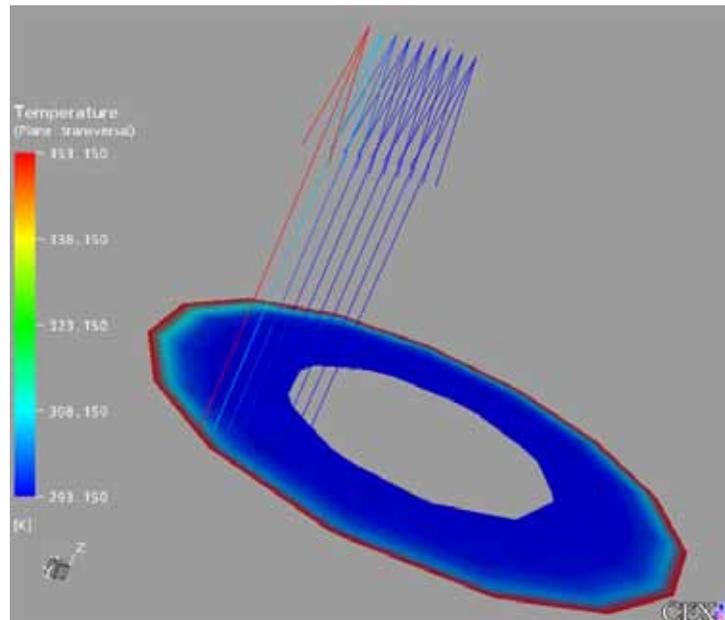
Z=1,00m

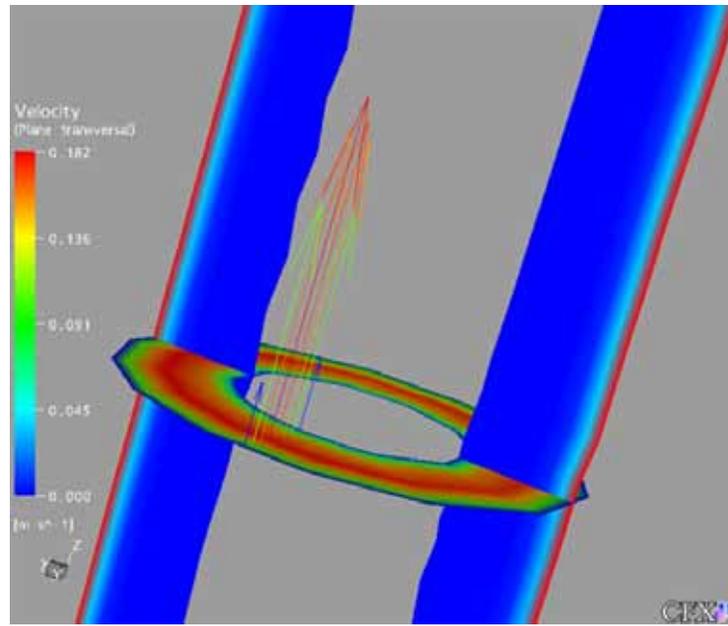


Z=1,90m



Las representaciones gráficas de los planos de temperatura, velocidades y combinación de ambos obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:

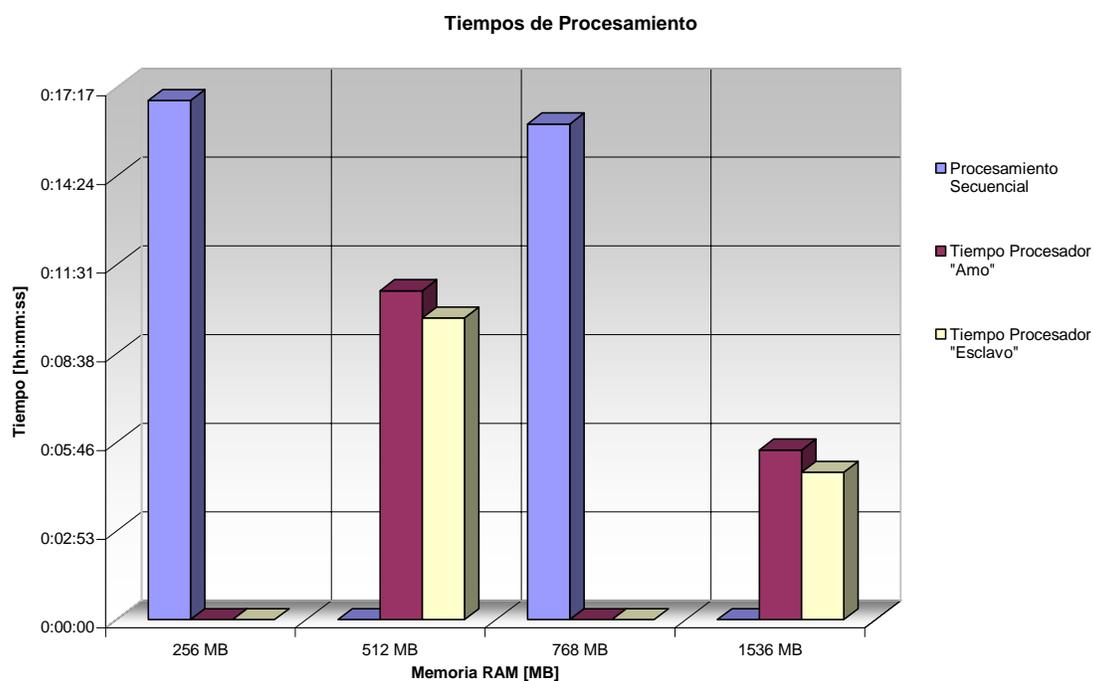




La comparación de los tiempos de ejecución y de la utilización de memoria para este caso es:

		256 MB	512 MB	768 MB	1536 MB
Procesamiento Secuencial		0:16:52	N/A	0:16:06	N/A
Procesamiento Paralelo	Amo	N/A	0:10:41	N/A	0:05:31
	Esclavo	N/A	0:09:48	N/A	0:04:47

Nota: Todos los tiempos poseen el formato hh:mm:ss
 Los tiempos "Amo" y "Esclavo" son referidos al tiempo de procesador
 N/A: No Aplica



Caso 2:

Datos de la región de entrada:

$$T_i = 293,15\text{K}$$

$$\text{Re} = 500$$

$$v_i = 4,77904 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho_i = 864,9209 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$D_h = \frac{4A_a}{P}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

$$\frac{D_i}{D_o} = 0,5$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} \left(D_o^2 - \frac{D_o^2}{4} \right) = \frac{3\pi D_o^2}{16}$$

$$P = \pi(D_o + D_i) = \frac{3\pi D_o}{2}$$

$$D_h = \frac{D_o}{2} = 0,0362\text{m}$$

$$\text{Re} = \frac{V_m D_o}{\nu} \Rightarrow V_m = \frac{\text{Re} \cdot \nu}{D_o}$$

$$V_m = \frac{500 * 4,77904 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{0,0381\text{m}} = 0,2714 \text{ m}/\text{s}$$

$$\dot{m} = \rho_i * V_m * A_a = 0,5249 \text{ kg}/\text{s}$$

Gradiente de presión:

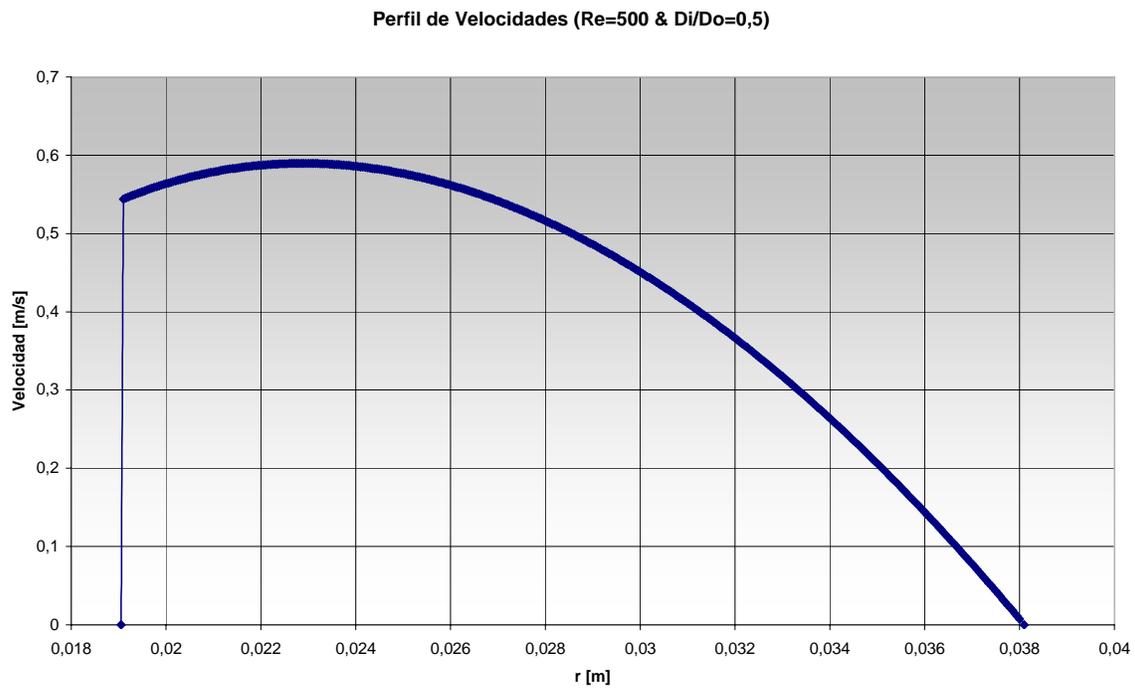
$$\frac{dp}{dz} = \frac{64}{500} \frac{(0,6272\text{m})^2}{2 * 0,0381\text{m}} 846,7589 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 589,4821 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Los Valores obtenidos con la solución analítica y con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” para la velocidad media y la velocidad máxima se presentan en la siguiente tabla:

	Vmax [m s ⁻¹]	Vm [m s ⁻¹]
Solución Analítica	0,5896	0,5740
Solución CFX	0,8907	0,5505

Tabla 5-2

La gráfica del perfil de velocidad obtenido con la solución analítica se presenta a continuación:



Las gráficas obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” de los perfiles de velocidad obtenidos con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” se presentan a continuación:

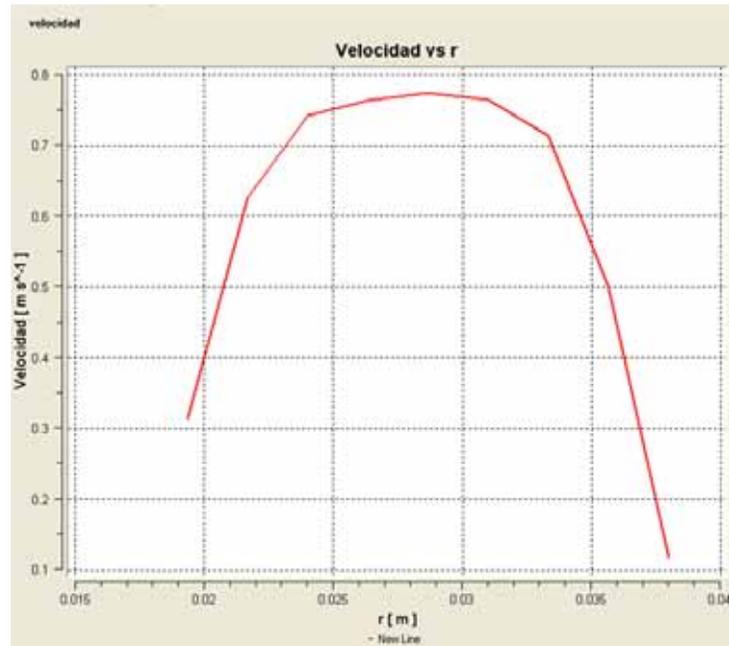
Z=0,01m



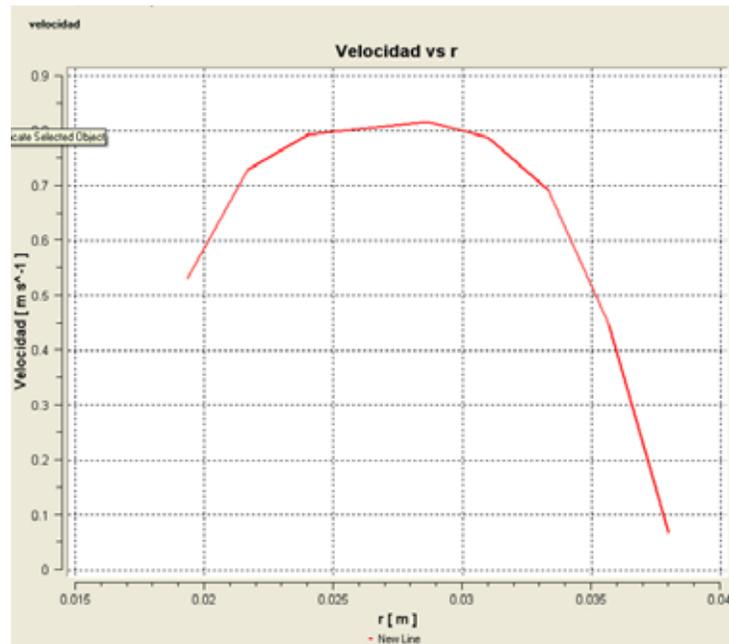
Z=0,03m



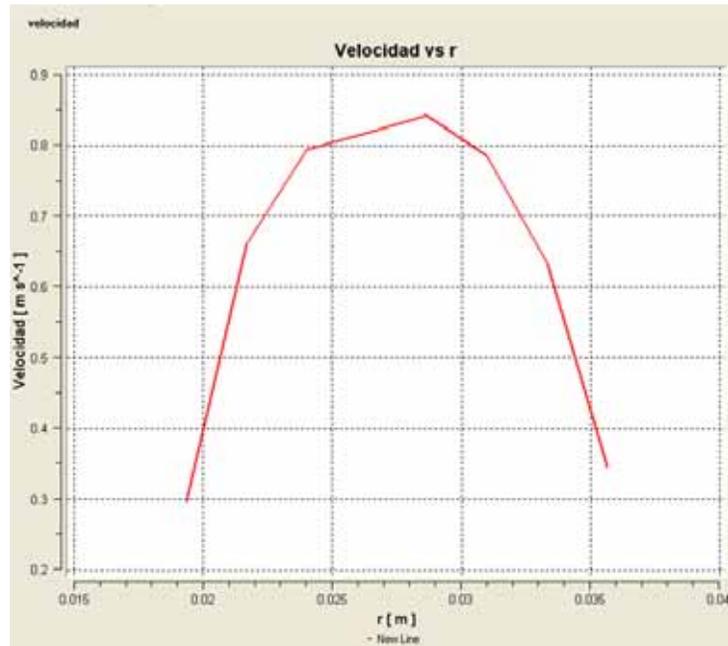
Z=0,05m



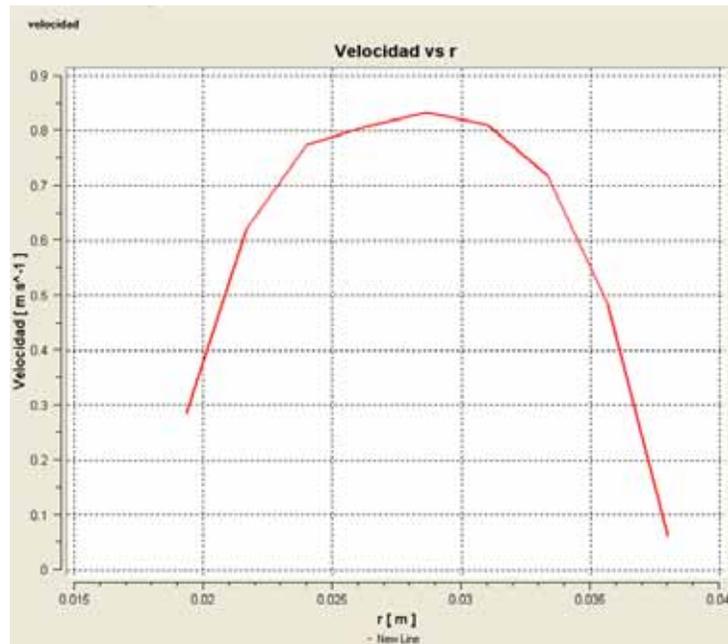
Z=0,09m



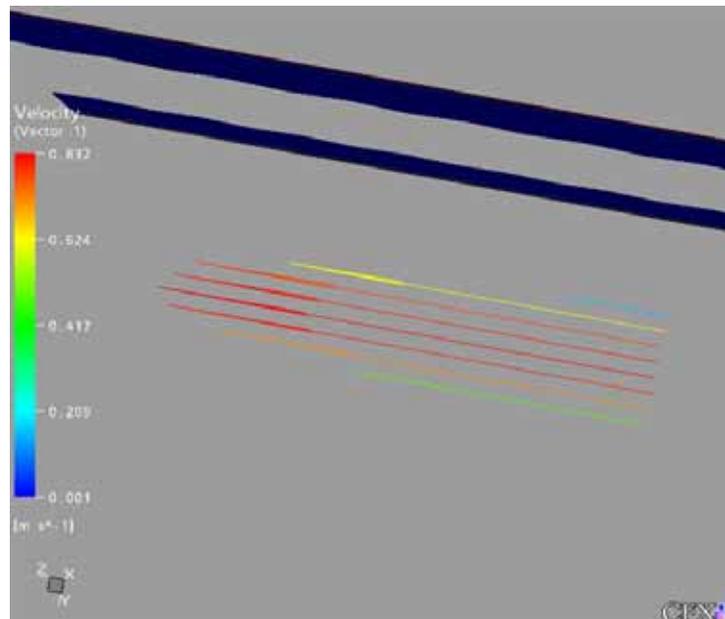
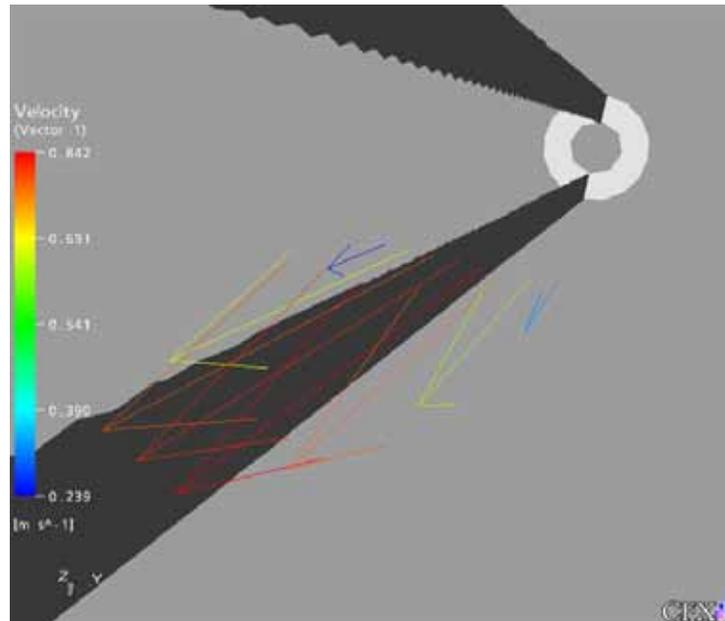
Z=1,00m



Z=1,90m

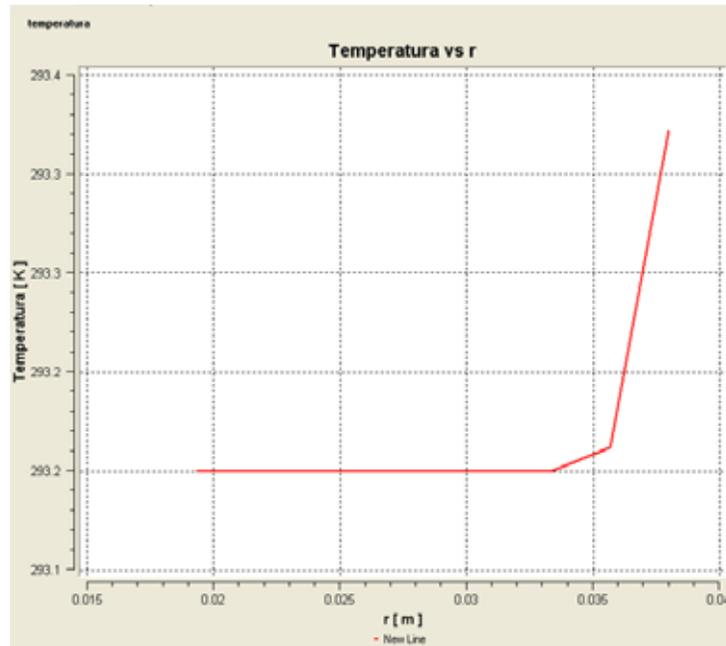


Las representaciones gráficas de los perfiles de velocidad obtenidas por el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:

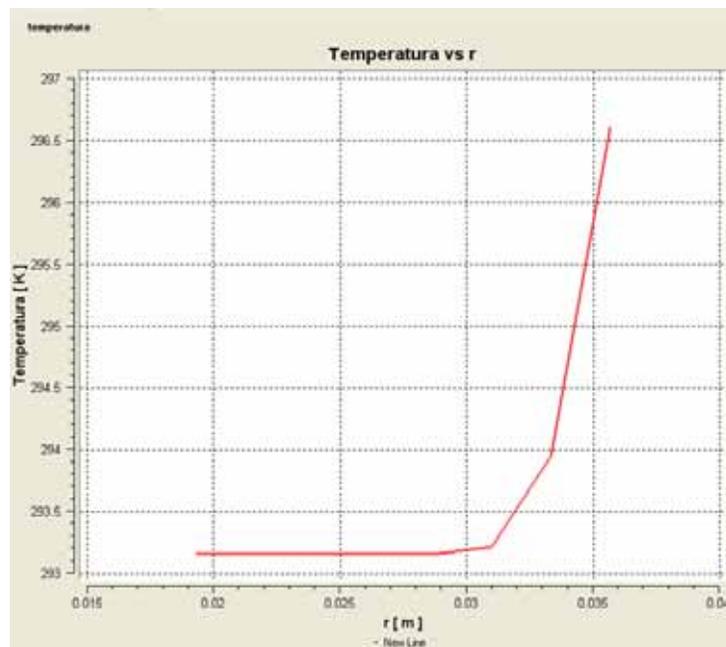


Las gráficas obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” de los perfiles de temperatura obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” se presentan a continuación:

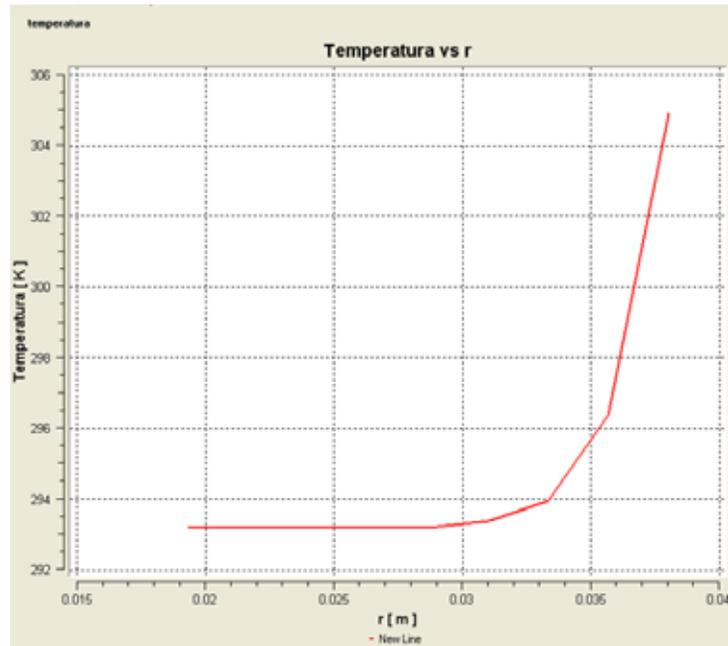
Z=0,10m



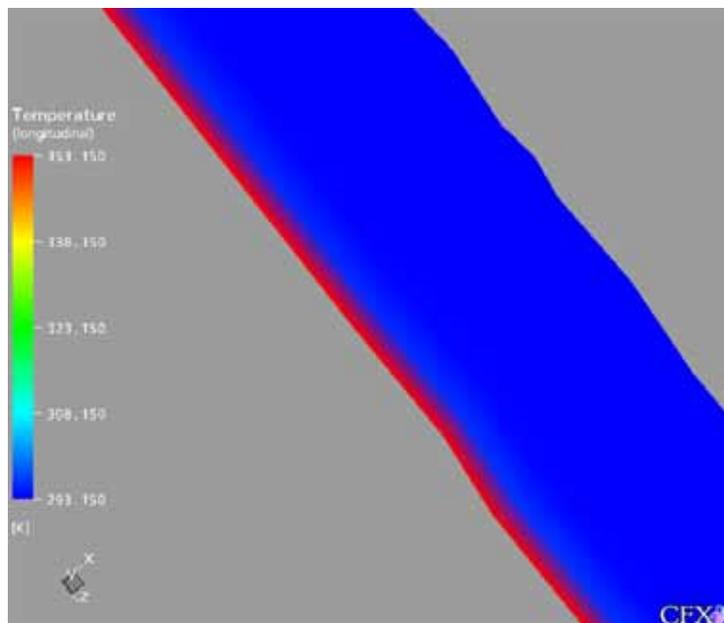
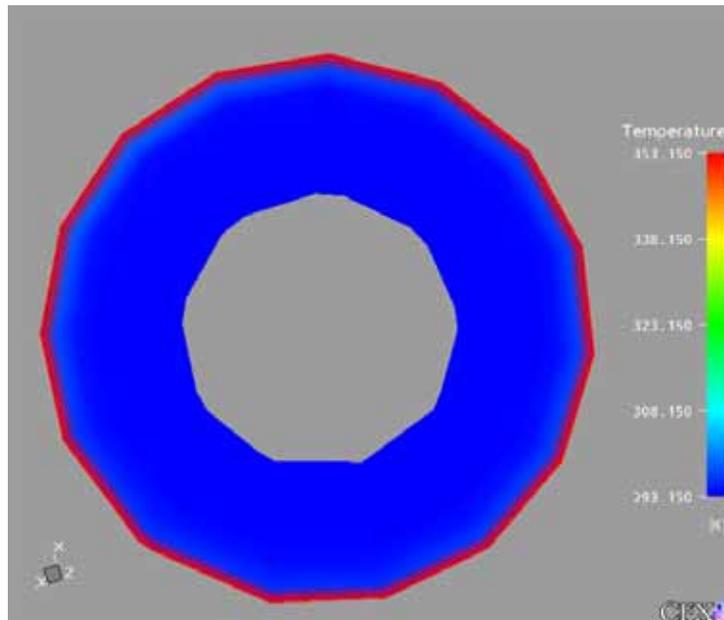
Z=1,00m

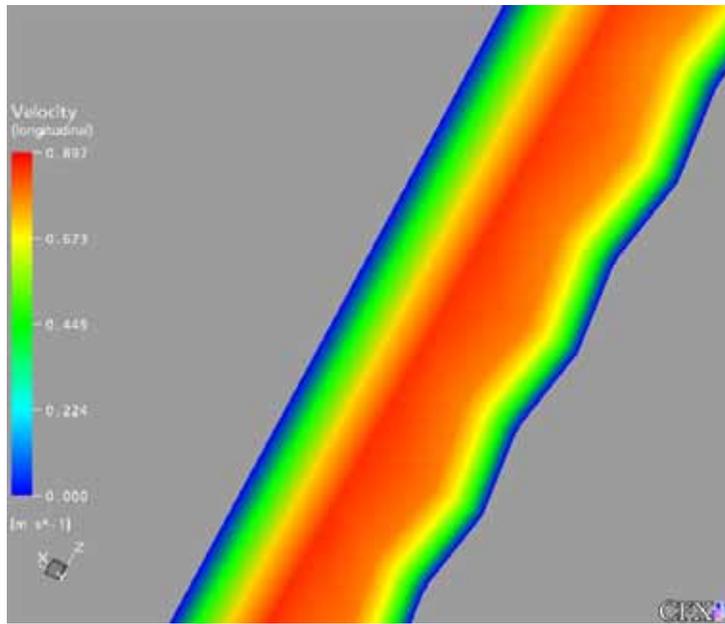
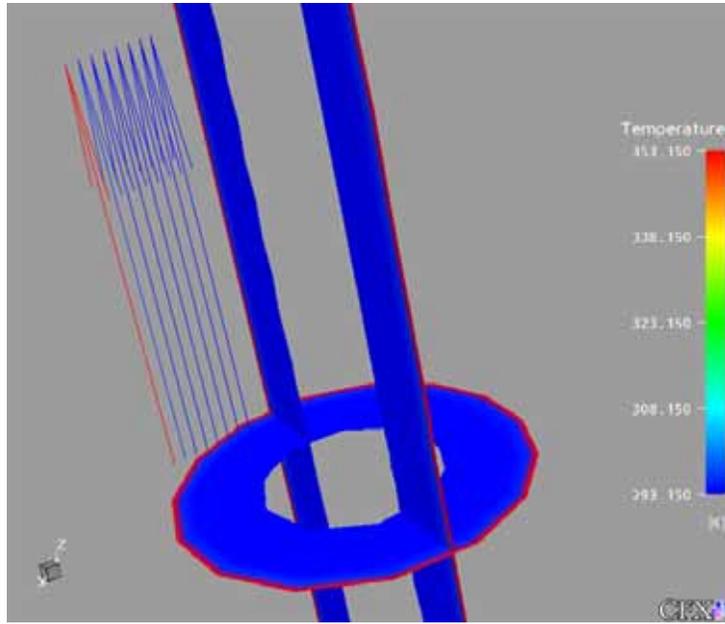


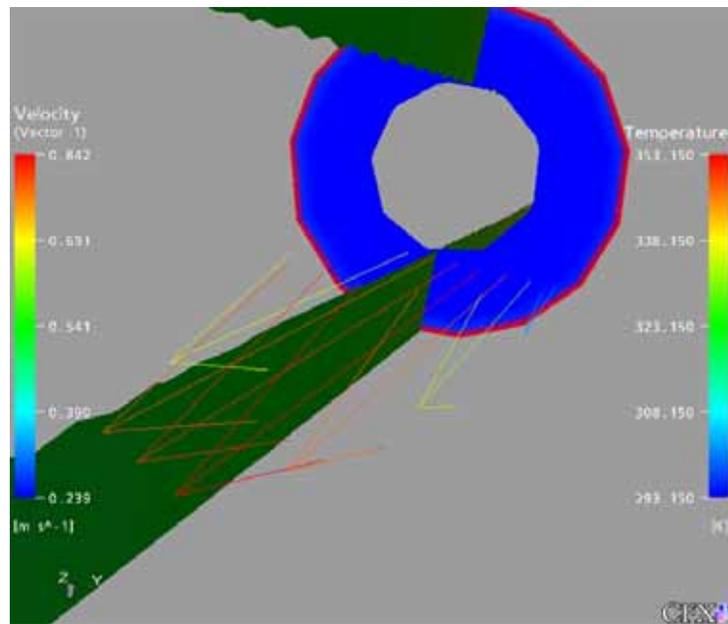
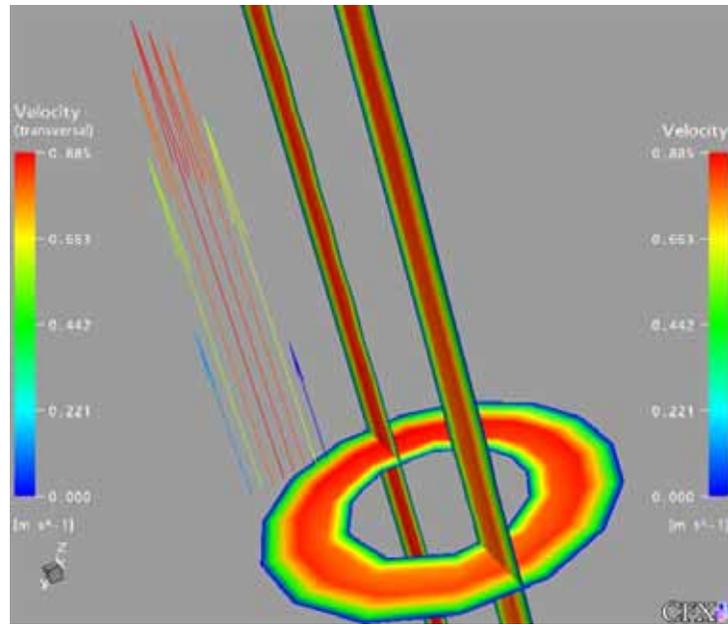
Z=1,90m



Las representaciones gráficas de los planos de temperatura, velocidades y combinación de ambos obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:



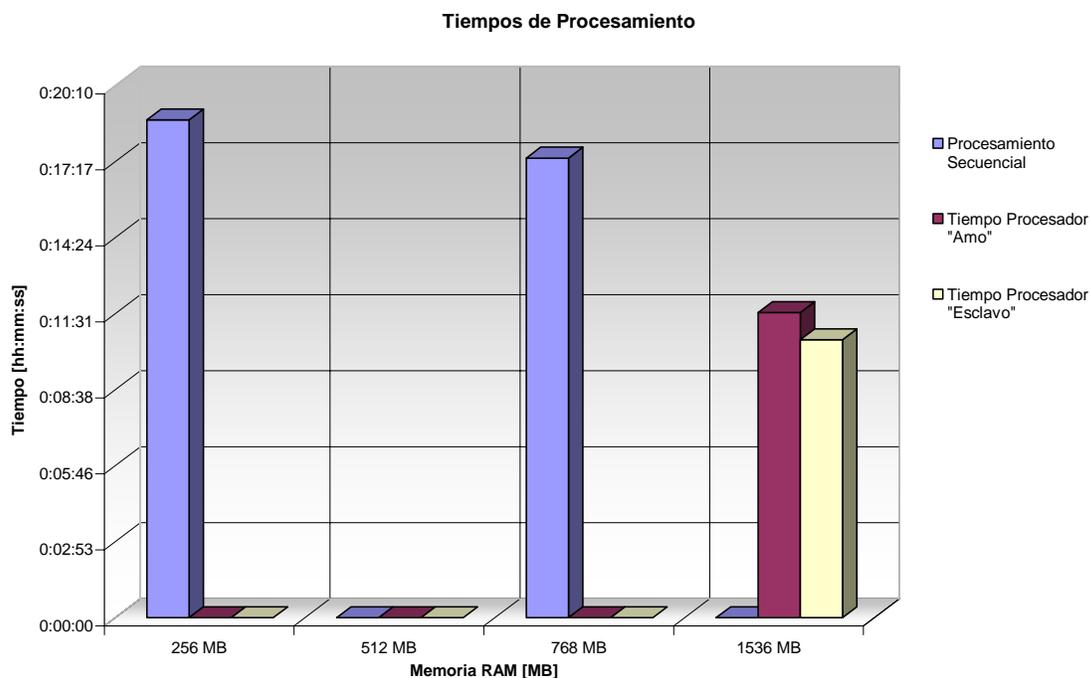




La comparación de los tiempos de ejecución y de la utilización de memoria para este caso es:

		256 MB	512 MB	768 MB	1536 MB
Procesamiento Secuencial		0:18:52	N/A	0:17:25	N/A
Procesamiento Paralelo	Amo	N/A	N/R	N/A	0:11:34
	Esclavo	N/A	N/R	N/A	0:10:32

Nota: Todos los tiempos poseen el formato hh:mm:ss
 Los tiempos "Amo" y "Esclavo" son referidos al tiempo de procesador
 N/A: No Aplica
 N/R: No Realizado



Caso 3:

Datos de la región de entrada:

$$T_i = 293,15K$$

$$Re = 100$$

$$v_i = 4,77904 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho_i = 864,9209 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$D_h = \frac{4A_a}{P}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

$$\frac{D_i}{D_o} = \frac{1}{6}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} \left(D_o^2 - \frac{D_o^2}{36} \right) = \frac{35\pi D_o^2}{144}$$

$$P = \pi(D_o + D_i) = \frac{7\pi D_o}{6}$$

$$D_h = \frac{D_o}{2} = 0,0635\text{m}$$

$$Re = \frac{V_m D_o}{\nu} \Rightarrow V_m = \frac{Re \cdot \nu}{D_o}$$

$$V_m = \frac{100 * 4,77904 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{0,0635\text{m}} = 0,0753 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\dot{m} = \rho_i * V_m * A_a = 0,2888 \text{ kg}/\text{s}$$

Gradiente de presión:

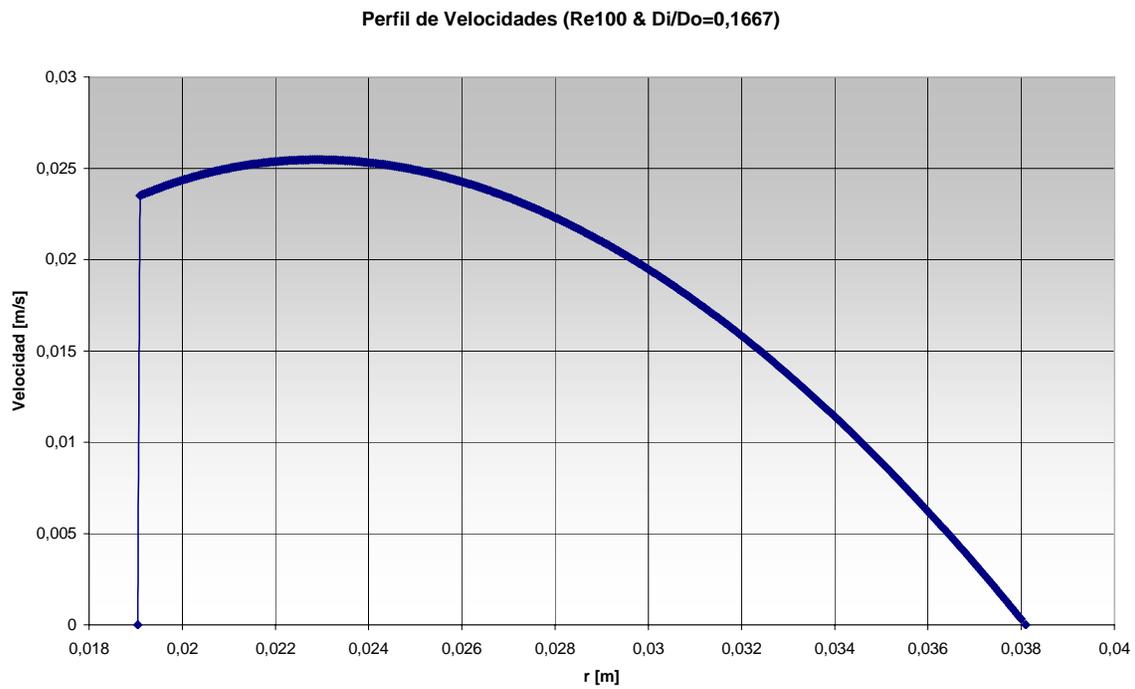
$$\frac{dp}{dz} = \frac{64}{100} \frac{(0,0753\text{m})^2}{2 * 0,0635\text{m}} 846,7589 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 24,1696 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Los Valores obtenidos con la solución analítica y con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” para la velocidad media y la velocidad máxima se presentan en la siguiente tabla:

	Vmax [m s ⁻¹]	Vm [m s ⁻¹]
Solución Analítica	0,0255	0,0144
Solución CFX	0,1105	0,0573

Tabla 5-3

La gráfica del perfil de velocidad obtenido con la solución analítica se presenta a continuación:

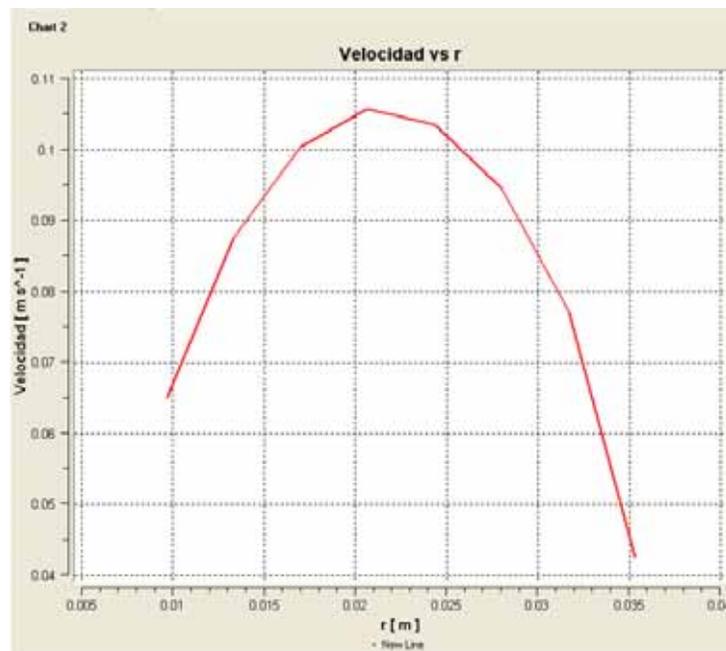


Las gráficas obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” de los perfiles de velocidad obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” se presentan a continuación:

Z=0,05m



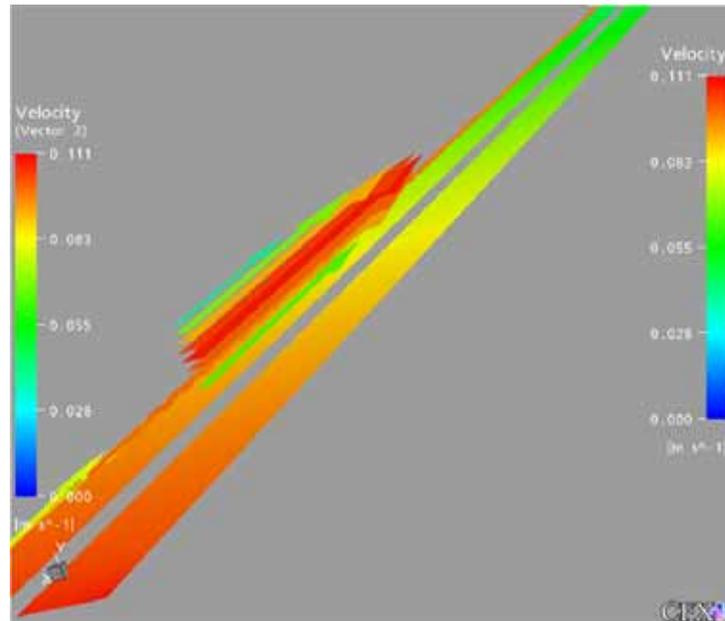
Z=1,00m



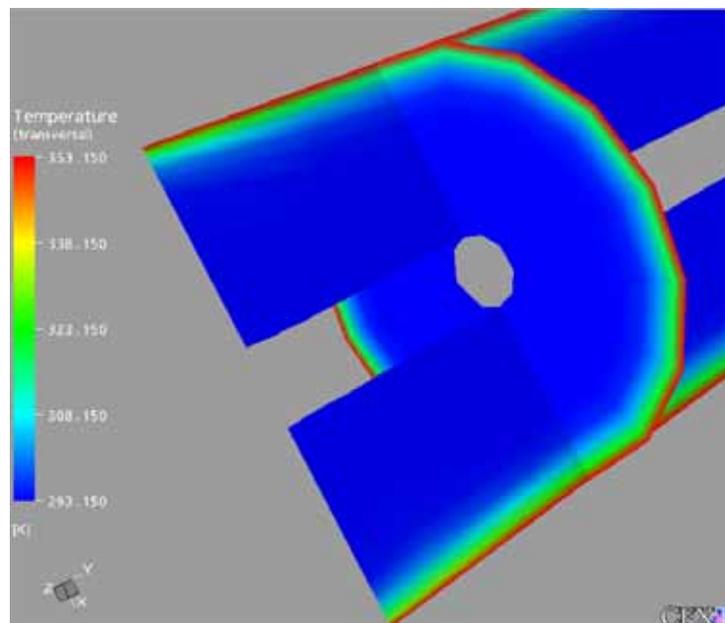
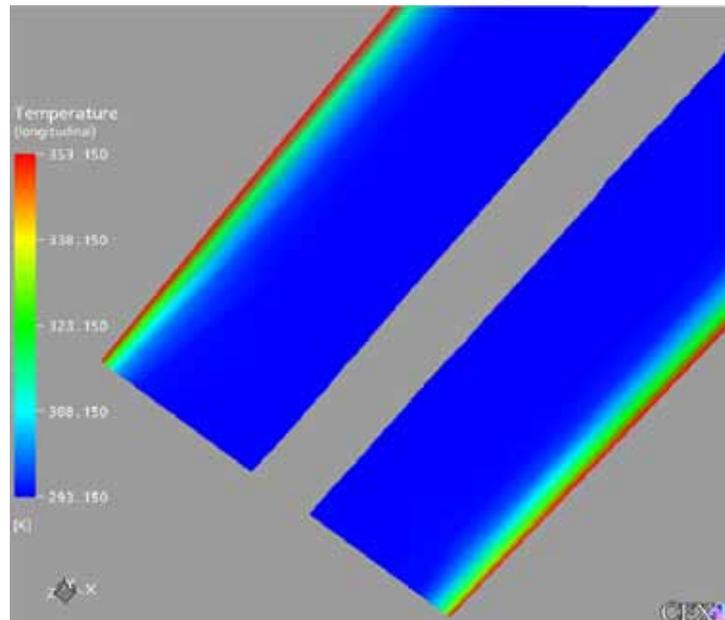
Z=1,95m

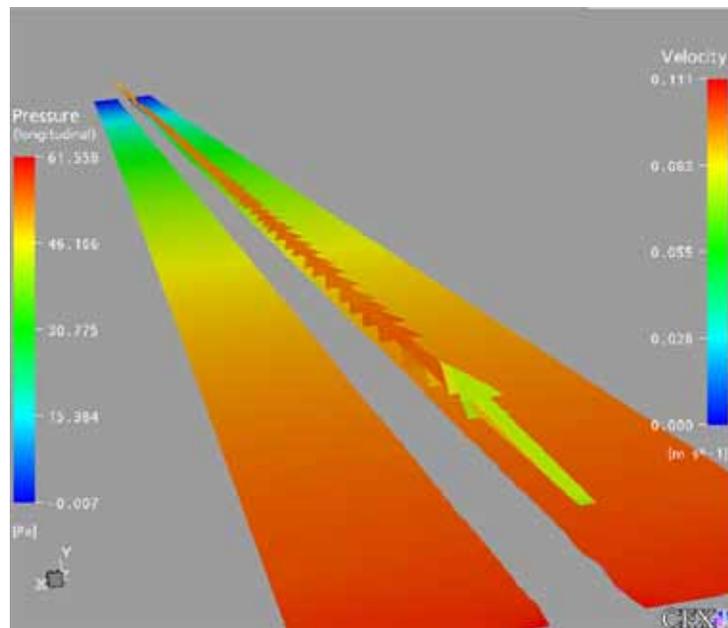
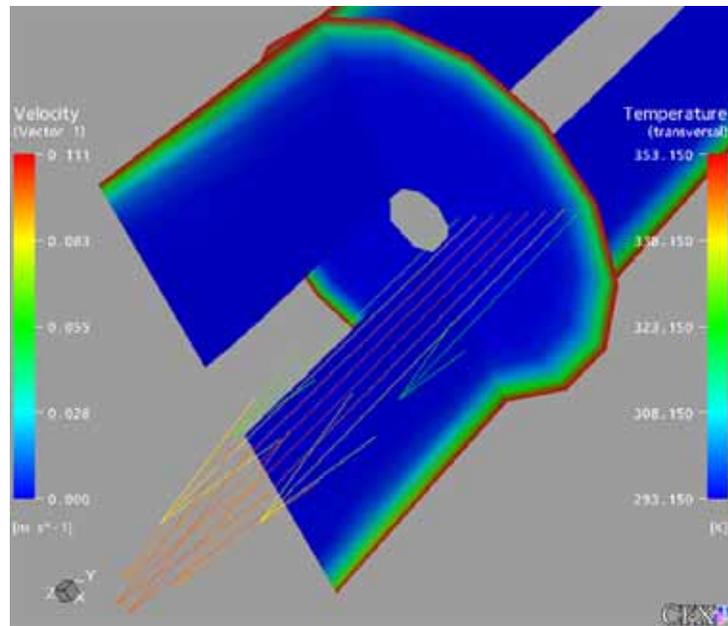


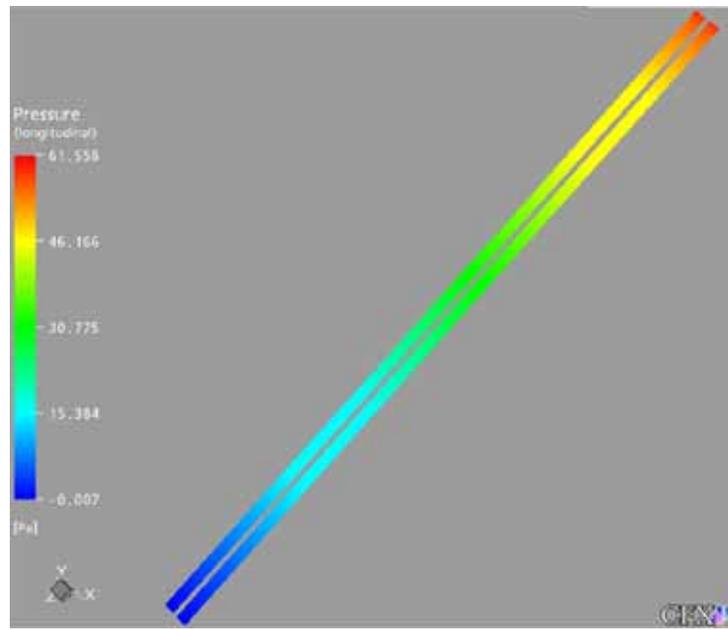
Las representaciones gráficas de los perfiles de velocidad obtenidas por el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:



Las representaciones gráficas de los planos de temperatura, planos de presión y perfiles de velocidades combinados, obtenidas por el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:



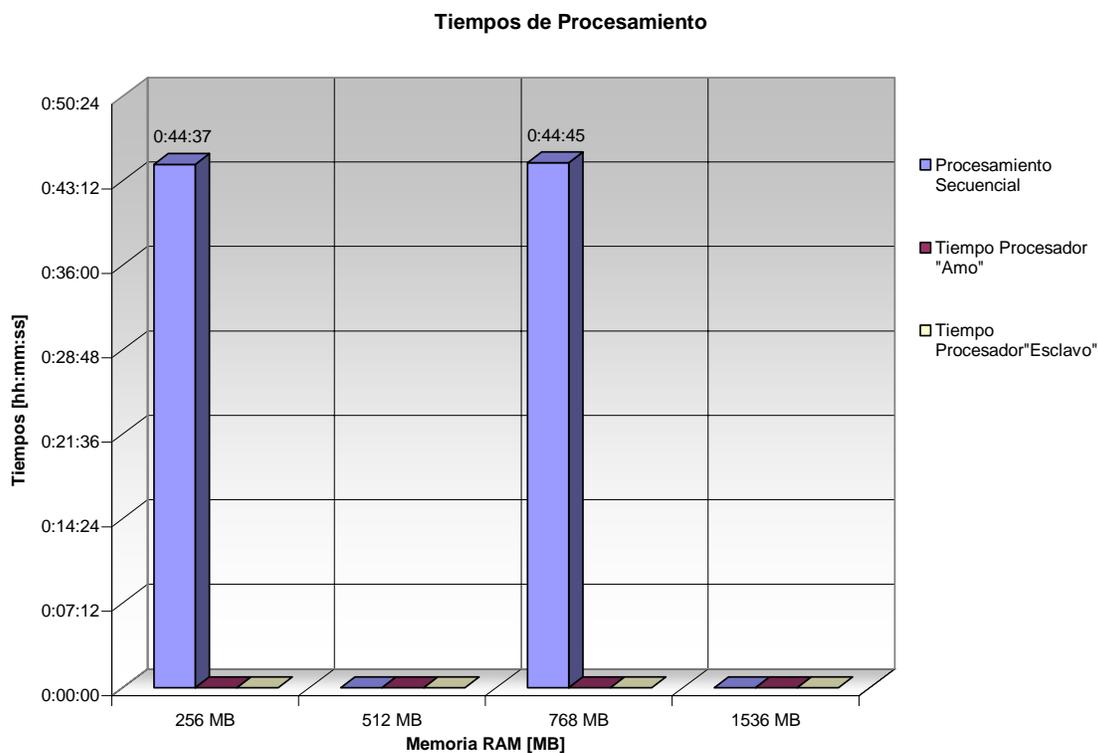




La comparación de los tiempos de ejecución y de la utilización de memoria para este caso es:

		256 MB	512 MB	768 MB	1536 MB
Procesamiento Secuencial		0:44:37	N/R	0:44:45	N/R
Procesamiento Paralelo	Amo	N/R	N/R	N/R	N/R
	Esclavo	N/R	N/R	N/R	N/R

Nota: Todos los tiempos poseen el formato hh:mm:ss
 Los tiempos "Amo" y "Esclavo" son referidos al tiempo de procesador
 N/R: No Realizado



Caso 4:

Datos de la región de entrada:

$$T_i = 293,15\text{K}$$

$$\text{Re} = 500$$

$$v_i = 4,77904 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho_i = 864,9209 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$D_h = \frac{4A_a}{P}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

$$\frac{D_i}{D_o} = \frac{1}{6}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} \left(D_o^2 - \frac{D_o^2}{36} \right) = \frac{35\pi D_o^2}{144}$$

$$P = \pi(D_o + D_i) = \frac{7\pi D_o}{6}$$

$$D_h = \frac{D_o}{2} = 0,0635\text{m}$$

$$\text{Re} = \frac{V_m D_o}{\nu} \Rightarrow V_m = \frac{\text{Re} \cdot \nu}{D_o}$$

$$V_m = \frac{500 * 4,77904 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{0,0635\text{m}} = 0,3763 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\dot{m} = \rho_i * V_m * A_a = 1,4430 \text{ kg}/\text{s}$$

Gradiente de presión:

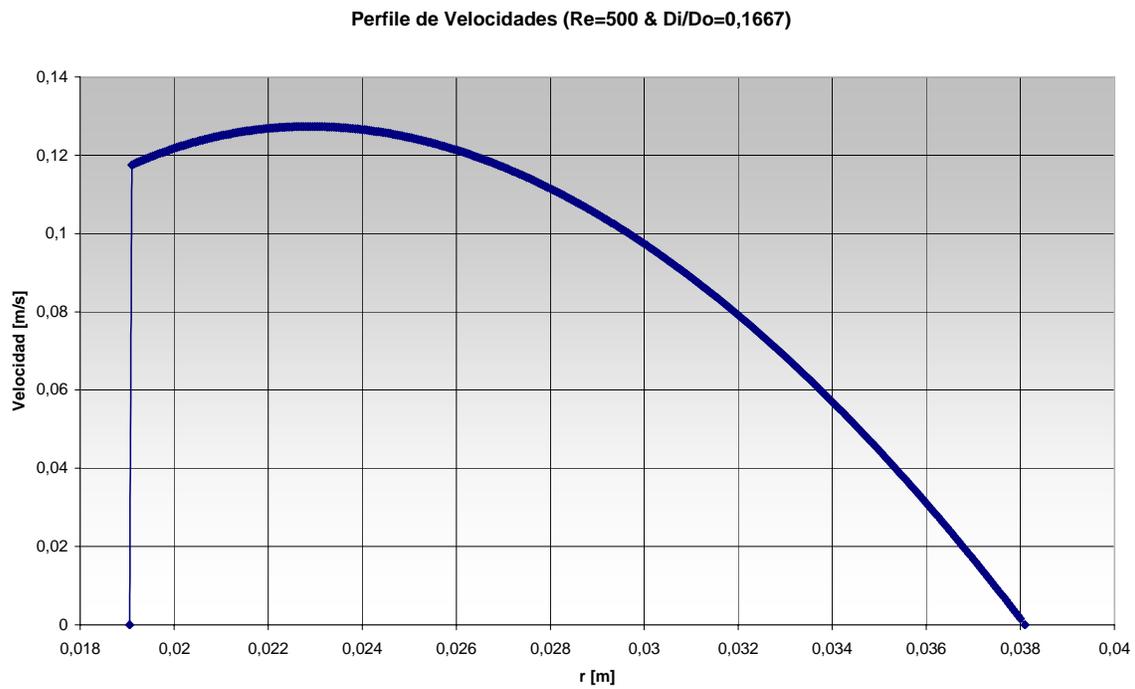
$$\frac{dp}{dz} = \frac{64}{500} \frac{(0,3763\text{m})^2}{2 * 0,0635\text{m}} 846,7589 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 120,8481 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Los Valores obtenidos con la solución analítica y con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” para la velocidad media y la velocidad máxima se presentan en la siguiente tabla:

	Vmax [m s ⁻¹]	Vm [m s ⁻¹]
Solución Analítica	0,6799	0,3837
Solución CFX	0,5448	0,3154

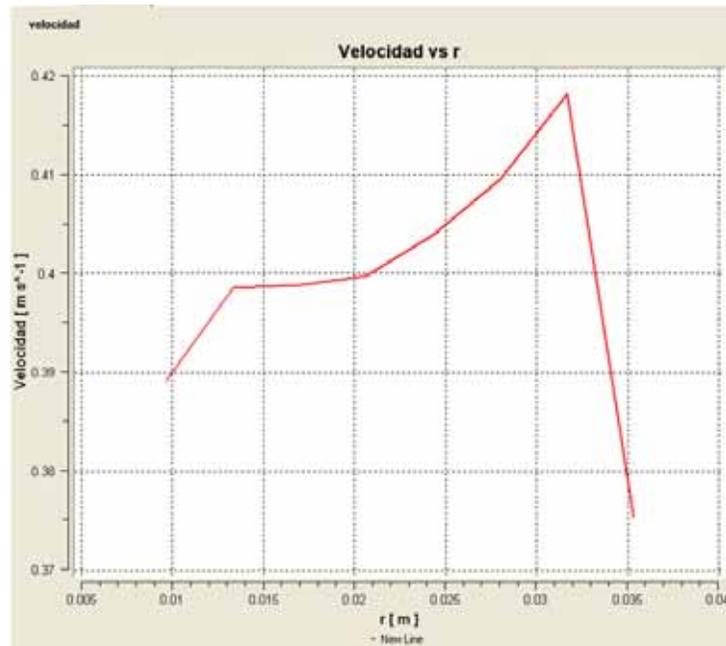
Tabla 5-4

La gráfica del perfil de velocidad obtenido con la solución analítica se presenta a continuación:



Las gráficas obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” de los perfiles de velocidad obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” se presentan a continuación:

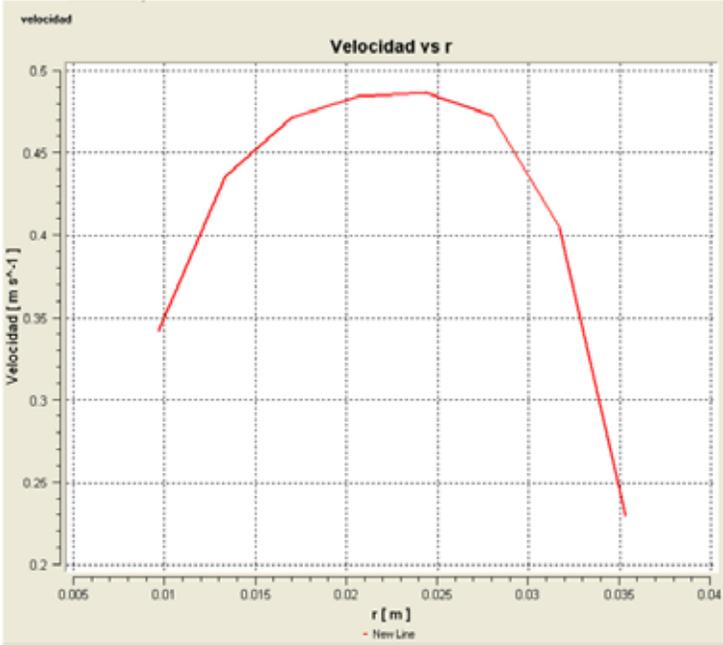
Z=0,01m



Z=0,03m



Z=0,06m



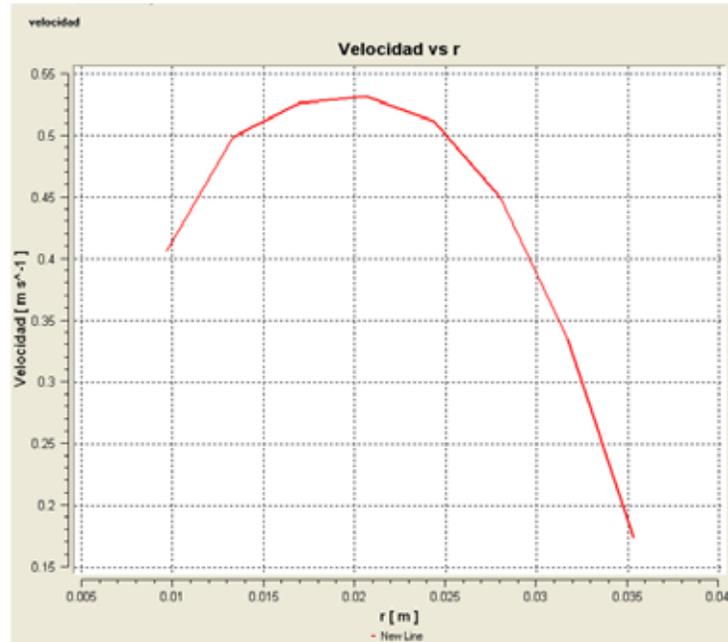
Z=0,10



Z=0,30

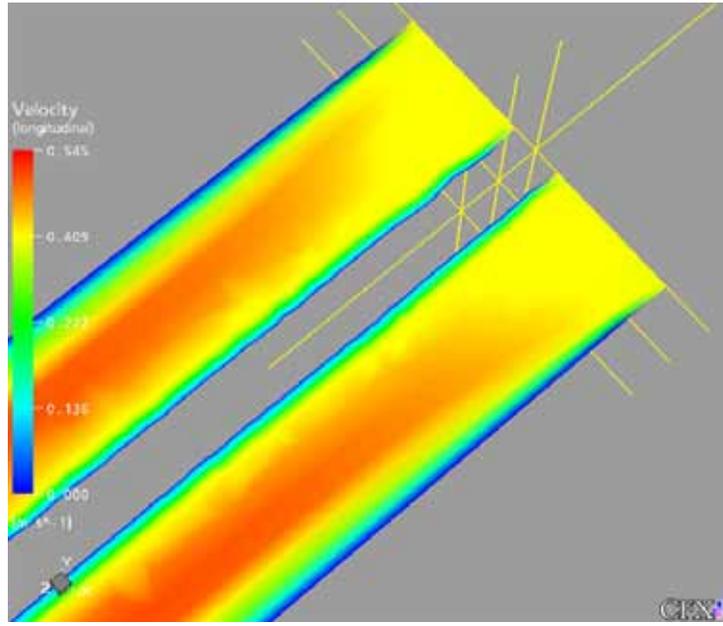


Z=0,40

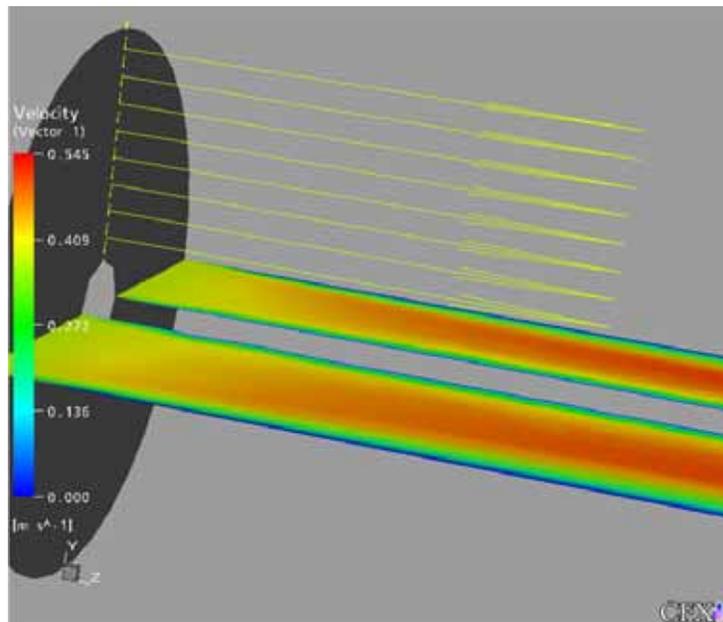


Las representaciones gráficas de los perfiles de velocidad obtenidas por el módulo “CFX-5.7 Post” se presentan a continuación:

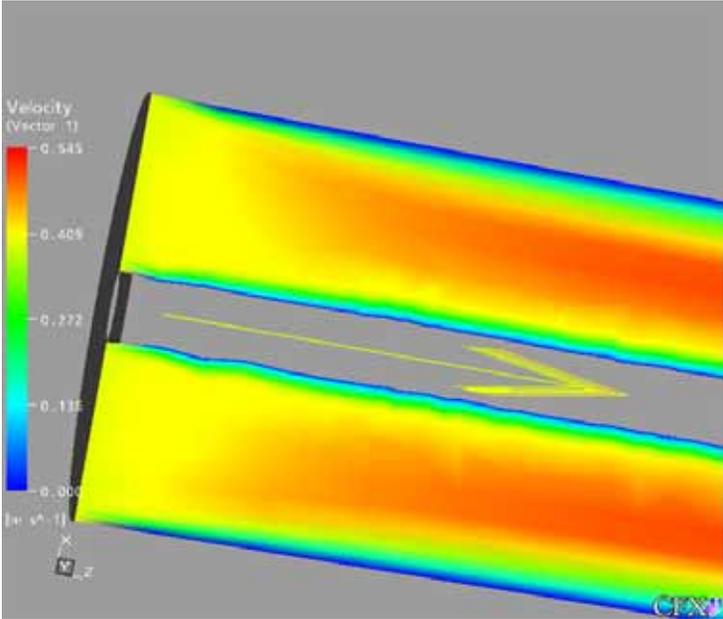
Z=0,01m



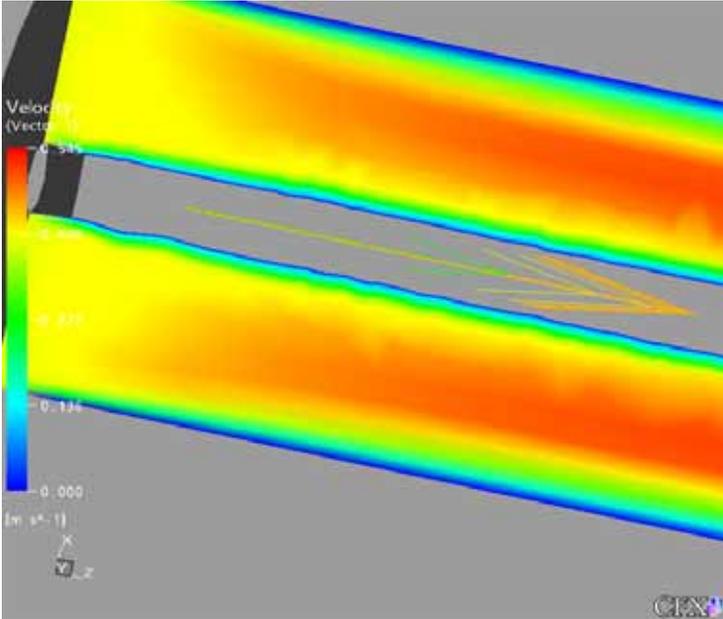
Z=0,01m



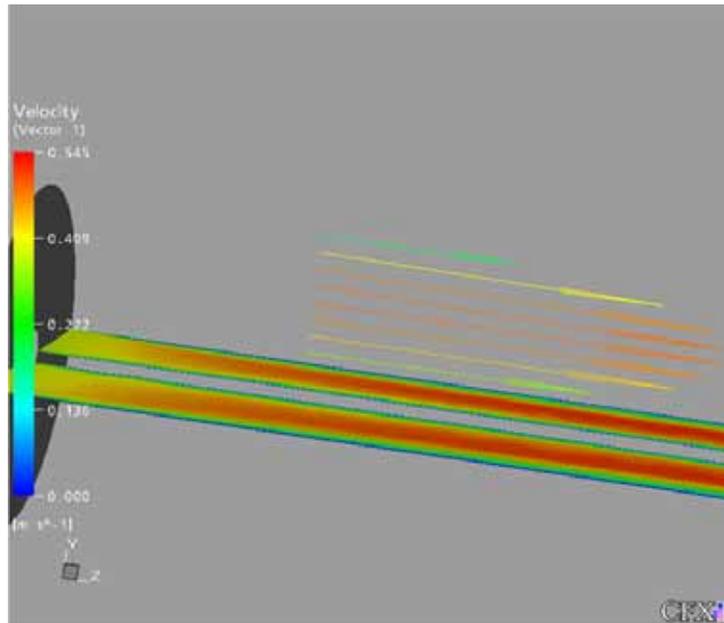
Z=0,01m



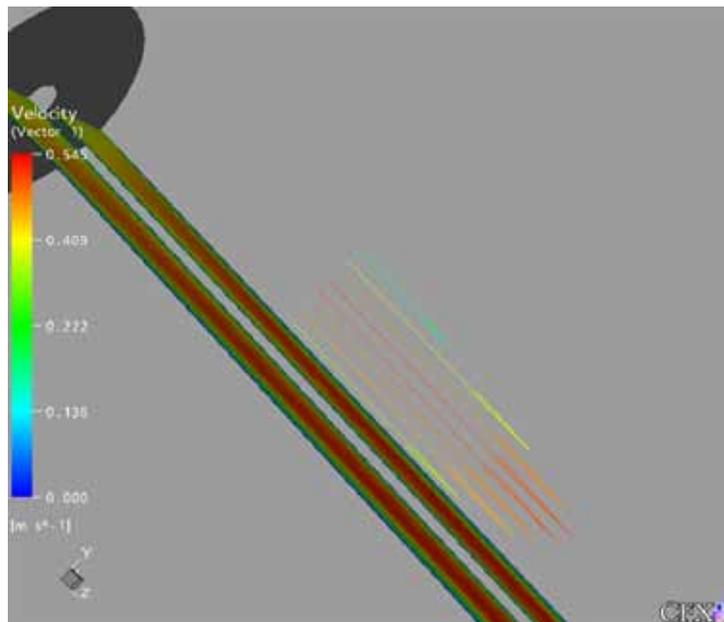
Z=0,03



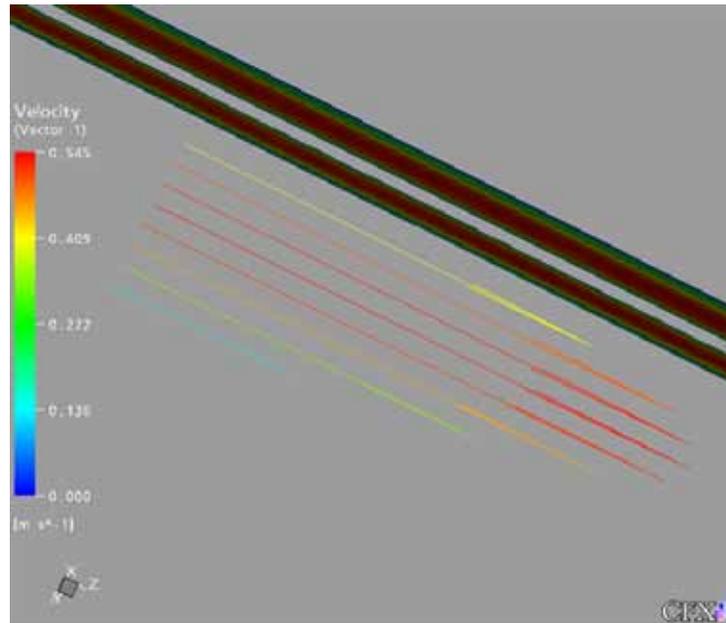
Z=0,06m



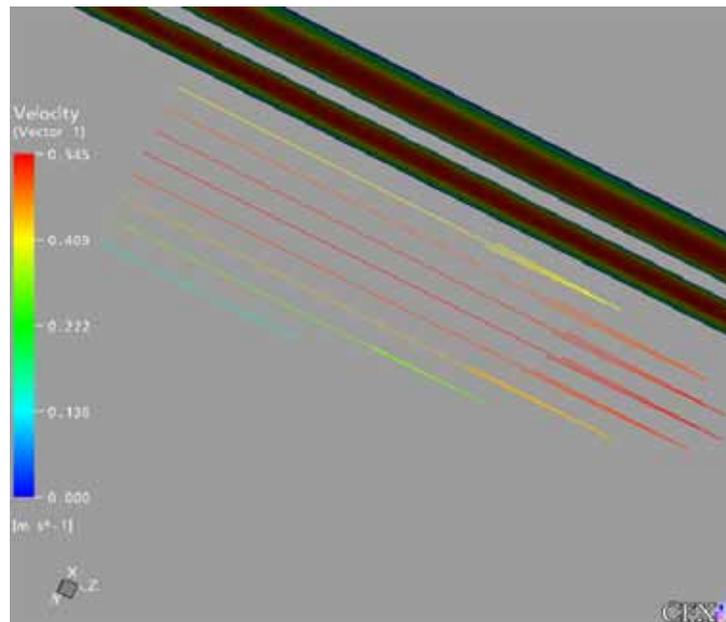
Z=0,10m



Z=0,30m

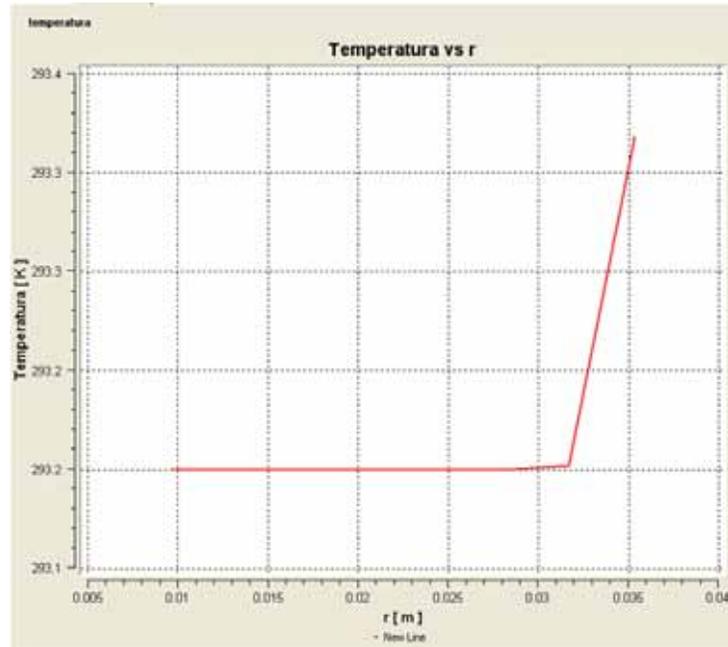


Z=0,40m

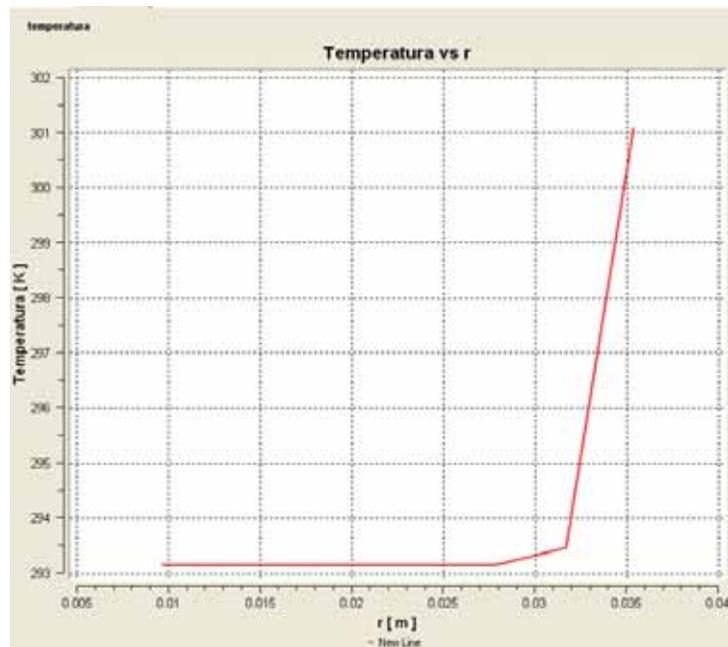


Las gráficas obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Post*” de los perfiles de temperatura obtenidas con el módulo “*CFX-5.7 Solver*” se presentan a continuación:

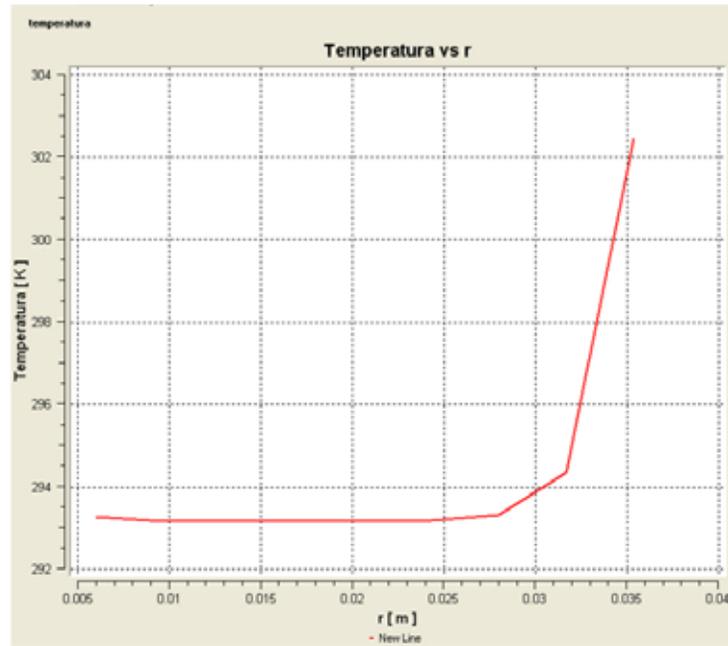
Z=0,00m



Z=1,00m

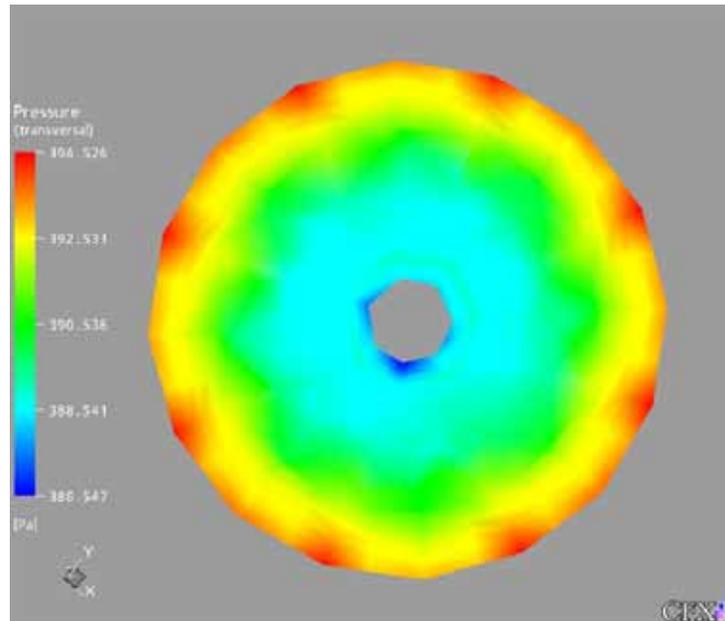


Z=2,00m

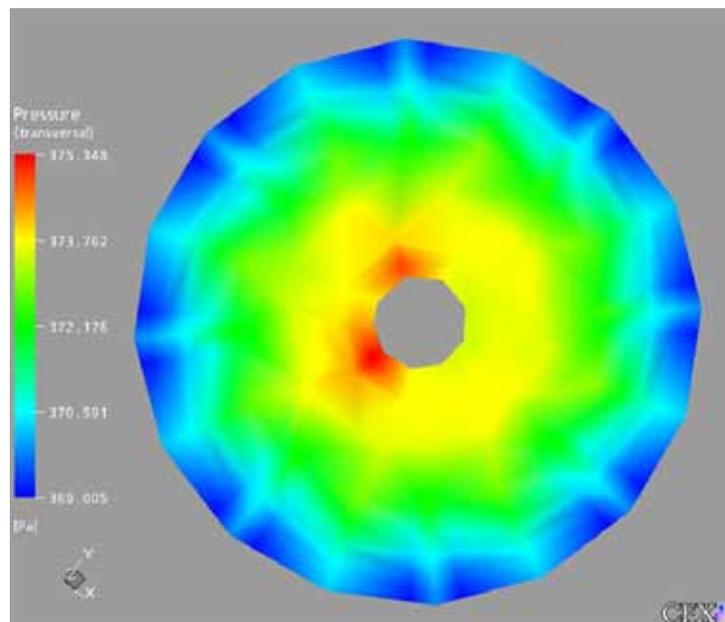


Las representaciones gráficas de los planos transversales de presión obtenidas por el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:

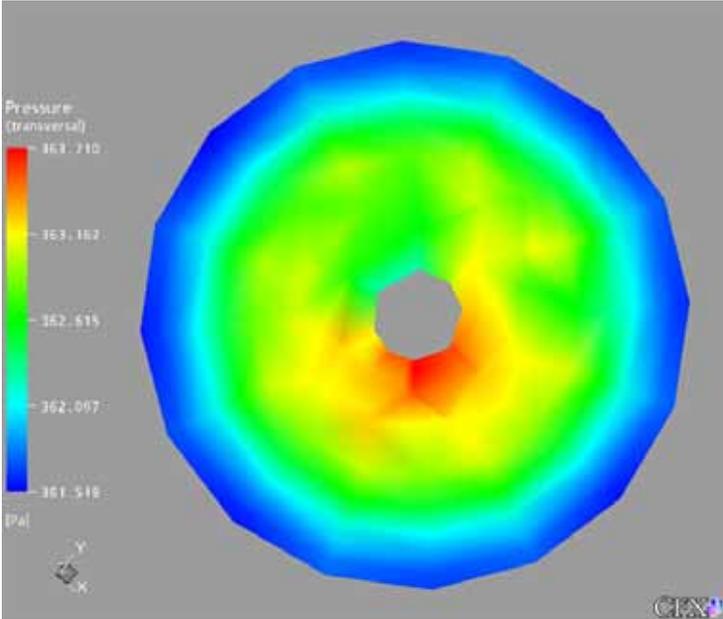
Z=0,01m



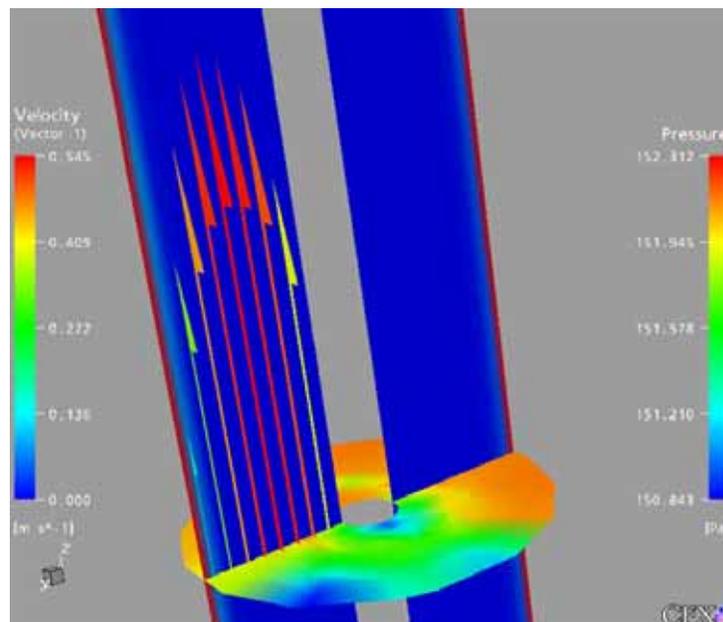
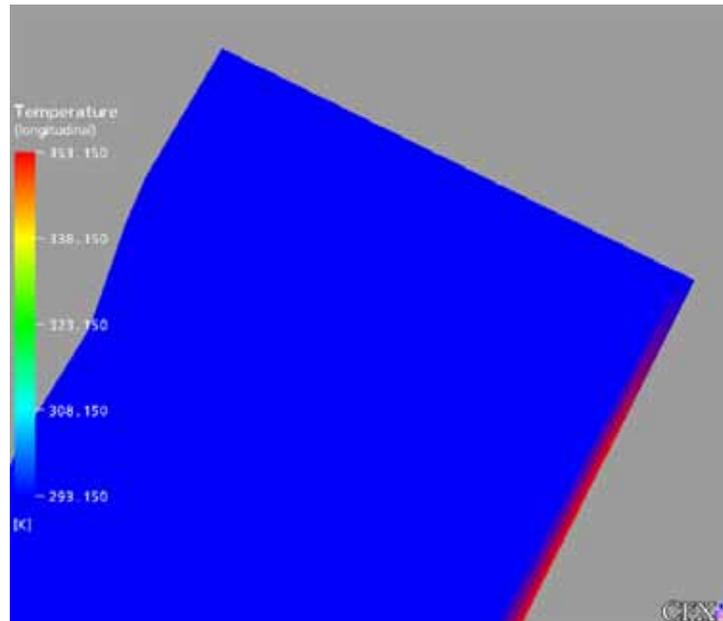
Z=0,03m



Z=0,05m



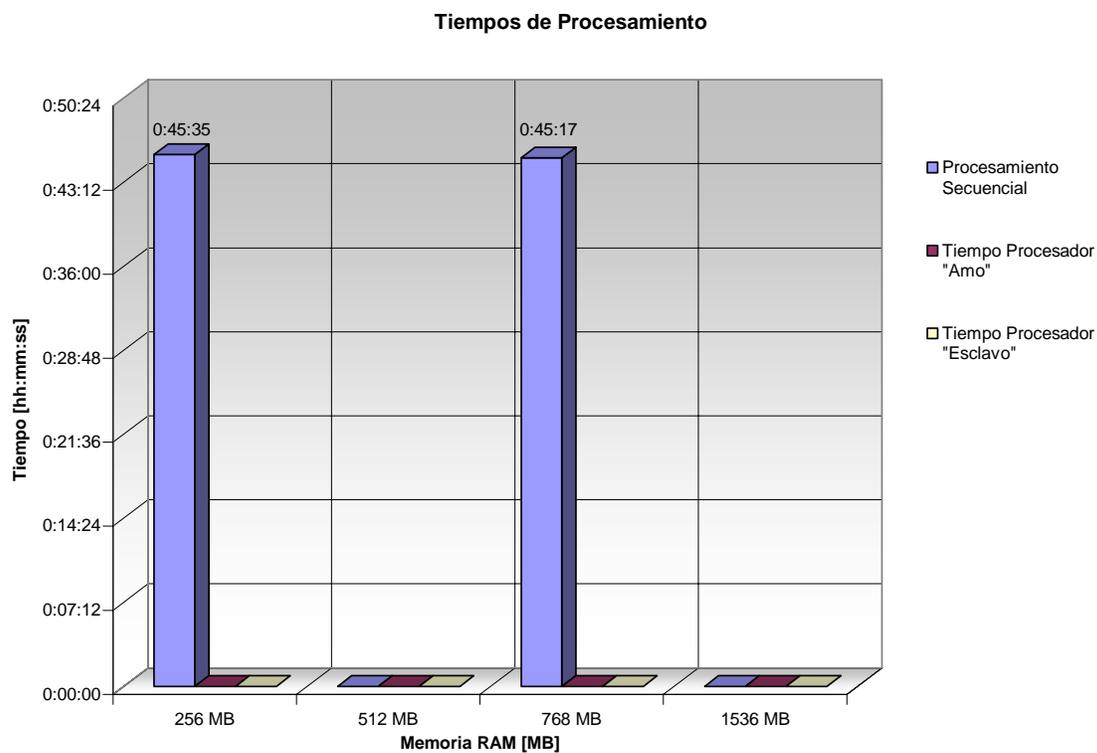
Las representaciones gráficas de planos generales de temperatura, presión y velocidad obtenidas por el módulo “*CFX-5.7 Post*” se presentan a continuación:



La comparación de los tiempos de ejecución y de la utilización de memoria para este caso es:

		256 MB	512 MB	768 MB	1536 MB
Procesamiento Secuencial		0:45:35	N/R	0:45:17	N/R
Procesamiento Paralelo	Amo	N/R	N/R	N/R	N/R
	Esclavo	N/R	N/R	N/R	N/R

Nota: Todos los tiempos poseen el formato hh:mm:ss
 Los tiempos "Amo" y "Esclavo" son referidos al tiempo de procesador
 N/R: No Realizado



CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores de las velocidades V_m y $V_{m\acute{a}x}$ obtenidos por medio del uso del módulo “*CFX-5.7 Post*” y las ecuaciones analíticas para los casos “1” y “2”, muestran que se encuentran dentro del mismo orden de magnitud pero con una diferencia en el orden de las décimas. Esto se debe en primer lugar al enfoque por medio del cual se abordó el problema de manera analítica, ya que para el desarrollo de tales ecuaciones, se tomaron valores promedios aritméticos de viscosidad cinemática (μ), gradiente de presión ($\frac{dp}{dz}$) y velocidad media (V_m), dichas consideraciones no representan de manera precisa el cambio de éstos parámetros respecto a la coordenada radial. En segundo lugar se encuentra que para la diferencia de diámetros ($\frac{D_i}{D_o}$) y la longitud axial escogida de éstos casos se aplicó una cantidad de elementos igual a 34979 los cual representa un incremento de más de 1% a la cantidad teórica recomendada. Se escogió esta cantidad debido a que el programa ANSYS Workbench 8.1 tiene por omisión ciertos parámetros para la construcción de la malla.

En los casos “3” y “4” se observa que la diferencia entre los valores calculados con la solución analítica y los valores obtenidos con el módulo “*CFX-5.7 Post*” no presentan mayores diferencias debido a la refinación de la malla presentando una cantidad de números de elementos igual a 95577.

Sin embargo no se puede decir que los resultados obtenidos por métodos analíticos no son correctos, por el contrario, la discrepancia es por demás esperada ya que las soluciones analíticas poseen un enfoque macroscópico donde se desprecian ciertos aspectos relacionados con la transferencia de calor.

El uso de métodos analíticos en la solución de problemas es una herramienta aproximada para poder cuantificar los valores de interés en un determinado caso, sin

embargo, en situaciones donde la geometría es irregular y existan condiciones de heterogeneidad, el desarrollo de estas es engorroso. Debido a tal situación se recurre al uso de los métodos numéricos el cual parte de un modelo discretizado para hallar las incógnitas deseadas, además de agilizar la convergencia a la solución dando resultados más aproximados.

Para este trabajo, se pudo observar la diferencia experimental de los perfiles de velocidad y la longitud dinámica de entrada obtenidos al variar el Número de Reynolds y fijar la relación de diámetros, lo cual era de esperar ya que al aumentar el parámetro Re la velocidad media aumenta y el perfil de velocidad cambia a una curva más plana en el punto máximo.

También es importante observar el incremento de la longitud térmica de entrada al aumentar el Número de Reynolds, observándose la escasa longitud radial de la capa térmica (espesor de la capa térmica), debido a que la alta viscosidad del fluido, no abarca un área transversal considerable, manteniendo de esta manera, las propiedades termofísicas del fluido.

Al comparar el cambio de la relación de diámetros fijando el valor del Número de Reynolds se observa que el perfil de velocidades y la longitud térmica de entrada presenta diferencias notorias. Ésta diferencia es predecible ya que la velocidad media del fluido disminuye, lo que implica un mayor tiempo de contacto entre la superficie de contorno y el fluido que la circunda.

Un aspecto importante es que al aumentar la relación de diámetros, la diferencia entre la solución analítica y la solución experimental disminuye. Se infiere que al aumentar la relación de diámetros, el perfil de velocidad se asemeja al perfil de velocidad dado para un flujo interno ($D_i = 0$).

Para el aspecto computacional se observa que el tiempo de Procesamiento Paralelo resulta menor que el tiempo de Procesamiento Secuencial al comparar el uso de cada procesador, lo que implica que los nodos pueden ser utilizados para otros procesos con un

tiempo de espera menor. Esto otorga adicionalmente la posibilidad de usar las estaciones de trabajo para otros procesos no exclusivos del *cluster* simultáneamente.

El Procesador “Amo”, se encarga de ordenar los resultados obtenidos por el procesador “Esclavo” lo cual consume un mayor tiempo para terminar el proceso. Es por esto que los tiempos de ambos procesadores difieren entre sí, siendo mayor el del procesador “Amo”.

Otros factores importantes en el tiempo de Procesamiento en paralelo es el uso del ancho de banda de la red, ya que el mismo restringe la cantidad de información transmitida entre los nodos y el uso de las computadoras al momento de ejecutar el Procesamiento Paralelo. La existencia de una mayor cantidad de procesos en una estación de trabajo, implica mayores tiempos de espera para cada ejecución.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se logró la configuración del *Cluster* para la operación y uso de la plataforma computacional en la Sala de Tesistas de la EIM, esto en base a un estudio efectuado de acuerdo a los requerimientos y disponibilidades de espacio físico, mobiliario y conexiones de red. En dicha sala se conformó una Red de Area Local (LAN) con doce (12) computadoras personales en ambiente heterogéneo Linux/Windows sobre la cual puede ejecutarse Procesamiento Paralelo.

Se efectuó la instalación y configuración del *software* CFX-5 en su versión 5.7, tanto para procesamiento secuencial como paralelo con el sistema operativo Windows en: “fobos”, “deimos”, “io”, “europa” y “ganimedes”. La instalación y configuración de dicho *software* con el sistema operativo Linux no se llevó a cabo. Sin embargo es importante resaltar que la versión 5.6 (versión anterior), se instaló sin contratiempos, pero al realizar la migración hacia la nueva versión se produjo un error para ejecutar el programa. También es importante destacar que la red con el sistema operativo Linux tiene habilitados todos los servicios y configuraciones necesarias para realizar procesamiento paralelo con CFX-5.

La licencia proporcionada por el IMF permite a cinco (5) usuarios ejecutar simultáneamente el CFX-5, pero sólo permite dos (2) procesos en paralelo, debido a esto hubo en la necesidad de cambiar la configuración amo-esclavo para obtener resultados con distintas configuraciones de memoria, lo que evidencia la total interconectividad de la red.

En los casos de estudio “1” y “2” se obtuvieron todos los resultados bajo cuatro (4) distintas configuraciones de memoria posibles, graficas en dos (2) y tres (3) dimensiones de velocidad, presión y temperatura, todas vs. Distancia radial y/o distancia longitudinal.

Se obtuvo el desarrollo del perfil de velocidad en la entrada del conducto formado entre los cilindros concéntricos, y se puede observar el cambio de dicho perfil totalmente plano a una curva semejante, en su forma, a una función parabólica-logarítmica. Además de evidenciarse la influencia de la temperatura, puede observarse la variación de dicho perfil con la relación diámetros y del número de Reynolds sobre la misma.

Queda en evidencia la sencillez del uso del *software* “CFX-5.7”, así como la claridad que muestran los resultados.

Recomendaciones

Sería conveniente incrementar el número de procesos en paralelo que permite la licencia.

Realizar el estudio de los dos últimos casos estudiados ($\frac{D_i}{D_o} = \frac{1}{6}$ con $Re=100$ y $Re=500$) ya que los mismos no se efectuaron en paralelo.

Mejorar el cableado de las computadoras “calisto”, “amaltea”, “titan”, “japetus”, “rea”, “tethys”, esto es, hacerlo estructurado de acuerdo a las normas “TIA/EIA 568 y TIA/EIA 758”. Es deseable realizar esta actividad lo antes posible, ya que está planificada la conexión del *Cluster* de la EIM con otros *Clusters* ubicados dentro y fuera de la Universidad, como el *Cluster* del IMF, conformando una *Grid*.

Realizar la interconexión con la red de computadoras de la sala de pre y post grado ubicada en el primer piso de la EIM, para ampliar así la capacidad del *Cluster*.

Designar una persona (pasante) a cargo del mantenimiento de la red de la sala que posea conocimientos y habilidades sobre los sistemas operativos Windows y Linux, además de rede de computadoras, etc.

Adquirir e instalar o desarrollar algún otro *software* relacionado con el ejercicio de la ingeniería mecánica, que pueda aprovechar las ventajas del *Cluster*.

Renovar constantemente la plataforma computacional adquiriendo nuevos equipos con *hardware* de mayores capacidades.

Se recomienda la utilización de esta plataforma computacional para futuros trabajos especiales de grado, tesis de especialización y maestría, no solo en Dinámica de Fluidos y Transferencia de Calor Computacionales, sino además en otras áreas involucradas en la formación del ingeniero mecánico, como Mecánica de Sólidos y las Vibraciones Mecánicas, entre otros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barry, W. Allen, M., 1999, *Parallel Programming, Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey

Bejan, A., 1993, *Heat Transfer*. Wiley. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Flynn, M., (1996), "Very High Speed Computing Systems". *IEEE*, Vol. 12, pp. 1901-1909.

Gil, A., 1998, "Modelo de simulación para convección forzada laminar entre placas paralelas". Tesis Ing. Mecánico, Tutores: García, F. y Segura, J., Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Gil, A., García, F. y Segura, J., 2001, "Modelo de simulación numérica para convección forzada laminar permanente entre placas paralelas". *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, Vol. 16, N° 2, pp. 45-51.

Heinbockel, J., 1996, *Introduction to Tensor Calculus and Continuum Mechanics*. Department of Mathematics and Statistic, Old Dominion University.

Incropera, F. and DeWitt, D., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Inc., 4th Ed., New York.

Kays, W.M. and Crawford, M.E., 1980, *Convective Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill, New York.

Kays, W.M. and Perkins, H.C., 1985, "Forced Convection: Internal Flow in Ducts", in *Handbook of Heat Transfer: Fundamentals*. Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P. and Ganic, E.N. (Eds.). McGraw-Hill, New York.

Kremenetsky, M., Tysinger, T. and Posey, S., 2000, "Considerations for Parallel CFD Enhancements on SGI ccNUMA and Cluster Architectures". *In proceedings of Parallel CFD 2000*, May 22-25, Trondheim, Norway.

López, E. y Ponce, M., 2005, "Análisis numérico del flujo laminar en desarrollo con altos números de Prandtl entre dos cilindros concéntricos". Tesis Ing. Mecánico, Tutor: Segura, J., Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Márquez, N., 2003, "Simulación numérica de reductores de presión de sección transversal variable". Tesis Ing. Mecánico, Tutores: Berrios, R. y Campos, M., Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Mills, A., 1994, *Transferencia de Calor*, Addison-Wesley / Times Mirror, Madrid.

Patankar, S., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere, Washington D.C.

Perales, V., Febrero 2005, *Arquitectura Paralela*, Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos16/arquitectura-paralela/arquitectura-paralela.shtml>

Sansone, E., 1998, "Análisis del flujo turbulento bidimensional en un difusor asimétrico de paredes planas mediante el método de elementos finitos". Tesis M.Sc. Ing. Hidráulica, Tutor: Quevedo, C., Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Segura, J., García, F., Morán, D. y García, R., 2003, "Transferencia de calor en flujo bifásico gas-líquido, parte II: tuberías y conductos anulares verticales". *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, (sometido a arbitraje).

Versteeg, H. and Malalasekera, W., 1995, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Longman Scientific & Technical, London.

Vicente, M., 1995, *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Publicaciones UCAB. Caracas, Venezuela.

Zanbrano, T., 2001, “Análisis del flujo turbulento sobre un prisma de sección transversal cuadrada mediante simulación de vórtices grandes”. Tesis M.Sc. Ing. Mecánica, Tutor: Quevedo, C., Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Maliska, C., 2004, *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. LTC Editora., 2da Ed., Rio de Janeiro.

ANEXO 1 FRAGMENTO DEL ARCHIVO DE RESULTADOS PARA EL PROCESAMIENTO SECUENCIAL

This run of the CFX-5.7 Solver started at 18:39:1 on 9 Jun 2005 by user cfxuser on EUROPA (intel_p4.sse2_winnt5.1) using the command:

```
C:\CFX\CFX-5.7\bin\perl\lib\cfx5solve.pl -stdout-comms -batch -ccl -
```

Setting up CFX-5 Solver run ...

```
+-----+
|                                             |
|           CFX Command Language for Run     |
|                                             |
+-----+
```

LIBRARY:

CEL:

EXPRESSIONS:

```
acp = 653.64 [ m^2 s^-2 K^-1]
ak = 0.1779 [kg m s^-3 K^-1]
bcp = 4.2884 [m^2 s^-2 K^-2]
bk = -0.00010058 [kg m s^-3 K^-2]
arho = 1042.2 [kg m^-3]
brho = -0.6048 [kg m^-3 K^-1]
cp = acp + bcp*T
k = ak + bk*T
rho = arho+brho*T
alpha = k/(rho*cp)
anu = 7.7921
bnu = -3.0665
tempadm = 1 [K]
nu = (10^10^(anu+bnu*log10(T/tempadm))-0.7)*0.000001 [m^2 s^-1]
miu = nu*rho
```

END

END

MATERIAL: P22

```
Material Description = oil
Material Group = User
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Liquid
```

PROPERTIES:

Option = General Material

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = miu

Option = Value

END

EQUATION OF STATE:

Density = 846.758 [kg m^-3]

Density Depends On = Temperature

Molar Mass = 1.0 [kg kmol^-1]

Option = Value

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Temperature = 25 [C]

Specific Heat Capacity = cp

Specific Heat Depends On = Temperature

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

```

THERMAL CONDUCTIVITY:
  Option = Value
  Thermal Conductivity = k
END
END
END
EXECUTION CONTROL:
PARALLEL HOST LIBRARY:
  HOST DEFINITION: europa
  Installation Root = C:\CFX\CFX-5.7
  Host Architecture String = intel_p4.sse2_winnt5.1
END
PARTITIONER STEP CONTROL:
  Multidomain Option = Independent Partitioning
  Runtime Priority = Standard
MEMORY CONTROL:
  Memory Allocation Factor = 1.0
END
PARTITIONING TYPE:
  MeTiS Type = k-way
  Option = MeTiS
  Partition Size Rule = Automatic
END
RUN DEFINITION:
  Definition File = c:/256/re100.def
  Interpolate Initial Values = Off
  Run Mode = Full
END
SOLVER STEP CONTROL:
  Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION:
  Double Precision = Off
END
MEMORY CONTROL:
  Memory Allocation Factor = 1.0
END
PARALLEL ENVIRONMENT:
  Number of Processes = 1
  Start Method = Serial
END
END
FLOW:
SOLUTION UNITS:
  Angle Units = [rad]
  Length Units = [m]
  Mass Units = [kg]
  Solid Angle Units = [sr]
  Temperature Units = [K]
  Time Units = [s]
END
SIMULATION TYPE:
  Option = Steady State
END
DOMAIN: Default Domain
  Coord Frame = Coord 0
  Domain Type = Fluid
  Fluids List = P22
  Location = Assembly
BOUNDARY: entrada
  Boundary Type = INLET
  Location = F3.B1.P3
BOUNDARY CONDITIONS:
  FLOW REGIME:
    Option = Subsonic
  END
  HEAT TRANSFER:

```

```

Option = Total Temperature
Total Temperature = 293.15 [K]
END
MASS AND MOMENTUM:
Normal Speed = 0.075260472 [m s^-1]
Option = Normal Speed
END
END
BOUNDARY: salida
Boundary Type = OUTLET
Location = F2.B1.P3
BOUNDARY CONDITIONS:
FLOW REGIME:
Option = Subsonic
END
MASS AND MOMENTUM:
Mass Flow Rate = 0.288601887 [kg s^-1]
Option = Mass Flow Rate
END
END
DOMAIN MODELS:
BUOYANCY MODEL:
Option = Non Buoyant
END
DOMAIN MOTION:
Option = Stationary
END
REFERENCE PRESSURE:
Reference Pressure = 1 [atm]
END
FLUID MODELS:
COMBUSTION MODEL:
Option = None
END
HEAT TRANSFER MODEL:
Include Viscous Work Term = false
Option = Total Energy
END
THERMAL RADIATION MODEL:
Option = None
END
TURBULENCE MODEL:
Option = Laminar
END
BOUNDARY: exterior
Boundary Type = WALL
Location = F1.B1.P3
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Fixed Temperature = 353.15 [K]
Option = Fixed Temperature
END
WALL INFLUENCE ON FLOW:
Option = No Slip
END
END
BOUNDARY: interior
Boundary Type = WALL
Location = F4.B1.P3
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Fixed Temperature = 293.15 [K]
Option = Fixed Temperature
END
WALL INFLUENCE ON FLOW:

```

```

    Option = No Slip
  END
END
END
END
OUTPUT CONTROL:
RESULTS:
  File Compression Level = Default
  Option = Full
  Output Boundary Flows = All
  Output Equation Residuals = All
  Output Variable Operators = All
END
END
SOLVER CONTROL:
ADVECTION SCHEME:
  Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
  Length Scale Option = Conservative
  Maximum Number of Iterations = 100
  Timescale Control = Auto Timescale
END
CONVERGENCE CRITERIA:
  Residual Target = 1.E-4
  Residual Type = RMS
END
DYNAMIC MODEL CONTROL:
  Global Dynamic Model Control = Yes
END
EQUATION CLASS: continuity
ADVECTION SCHEME:
  Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
  Length Scale Option = Conservative
  Timescale Control = Auto Timescale
END
END
EQUATION CLASS: energy
ADVECTION SCHEME:
  Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
  Length Scale Option = Conservative
  Timescale Control = Auto Timescale
END
END
EQUATION CLASS: momentum
ADVECTION SCHEME:
  Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
  Length Scale Option = Conservative
  Timescale Control = Auto Timescale
END
END
END
COMMAND FILE:
  Version = 5.7
  Results Version = 5.7
END

```

```

+-----+
| Solver |
+-----+

```

```

+-----+
|           CFX-5 Solver 5.7           |
| Version 2004.04.01-23.00   Thu Apr 1 23:46:14 GMTDT 2004 |
|           Executable Attributes       |
| single-32bit-optimised-supfort-noprof-nospag |
| Copyright 1996-2004 CFX Ltd.         |
+-----+

```

```

+-----+
|           Job Information           |
+-----+

```

Run mode: serial run

Host computer: EUROPA

Job started: Thu Jun 9 18:39:41 2005

```

+-----+
| Memory Allocated for Run (Actual usage may be less) |
+-----+

```

Data Type	Kwords	Words/Node	Words/Elem	Kbytes	Bytes/Node
Real	12203.9	339.85	127.69	47671.5	1359.39
Integer	4624.3	128.77	48.38	18063.7	515.10
Character	1996.0	55.58	20.88	1949.3	55.58
Logical	40.0	1.11	0.42	156.2	4.46
Double	868.2	24.18	9.08	6782.8	193.42

```

+-----+
| Total Number of Nodes, Elements, and Faces |
+-----+

```

Domain Name : Default Domain

```

Total Number of Nodes           = 35910
Total Number of Elements        = 95577
Total Number of Tetrahedrons    = 44317
Total Number of Prisms          = 51260
Total Number of Faces           = 10838

```

```

+-----+
| Reference Pressure Information |
+-----+

```

Domain Group: Default Domain

Pressure has not been set at any boundary conditions.
The pressure will be set to 0.00000E+00 at the following location:
Domain : Default Domain
Node : 1 (equation 1)
Coordinates : (3.81000E-02, 1.39973E-17, 2.00000E+00).

```

+-----+
|           Average Scale Information           |
+-----+

```

```

Domain Name : Default Domain
Global Length           = 2.0512E-01
Minimum Extent          = 7.6200E-02
Maximum Extent          = 2.0000E+00
Density                 = 8.4676E+02
Dynamic Viscosity       = 8.3456E-03
Velocity                = 7.6232E-02
Advection Time          = 2.6908E+00
Reynolds Number         = 1.5865E+03
Thermal Conductivity    = 1.4327E-01
Specific Heat Capacity at Constant Pressure = 2.1300E+03
Prandtl Number          = 1.2407E+02

```

```

+-----+
|           Checking for Isolated Fluid Regions           |
+-----+

```

No isolated fluid regions were found.

```

+-----+
|           The Equations Solved in This Calculation           |
+-----+

```

Subsystem Name : Momentum and Mass

- U-Mom
- V-Mom
- W-Mom
- P-Mass

Subsystem Name : Heat Transfer

- H-Energy

CFD Solver started: Thu Jun 9 18:39:55 2005

```

+-----+
|           Convergence History           |
+-----+

```

Timescale Information		
Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	7.97502E-01
V-Mom	Auto Timescale	7.97502E-01
W-Mom	Auto Timescale	7.97502E-01
P-Mass	Auto Timescale	7.97502E-01
H-Energy	Auto Timescale	7.97502E-01

```

=====
OUTER LOOP ITERATION = 1           CPU SECONDS = 7.55E+00
=====

```

```

| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |

```

```

+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom      | 0.00 | 4.7E-09 | 1.6E-07 | 1.2E+04 ok|
| V-Mom      | 0.00 | 4.7E-09 | 2.1E-07 | 1.1E+04 ok|
| W-Mom      | 0.00 | 1.9E-01 | 6.3E-01 | 2.7E-02 OK|
| P-Mass     | 0.00 | 2.2E-04 | 4.6E-03 | 9.5 8.8E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+
| H-Energy   | 0.00 | 7.1E-02 | 1.0E+00 | 5.7 3.2E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+

```

#####

#####

```

=====
OUTER LOOP ITERATION = 100          CPU SECONDS = 2.65E+03
=====

```

```

| Equation   | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom      | 0.99 | 3.1E-06 | 5.2E-05 | 9.6E-01 ok|
| V-Mom      | 1.00 | 3.0E-06 | 3.7E-05 | 9.7E-01 ok|
| W-Mom      | 0.94 | 1.2E-05 | 1.8E-04 | 1.4E-01 ok|
| P-Mass     | 0.99 | 2.0E-06 | 4.5E-05 | 13.8 9.9E-01 ok|
+-----+-----+-----+-----+
| H-Energy   | 0.94 | 9.4E-05 | 1.3E-03 | 5.7 3.8E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+

```

CFD Solver finished: Thu Jun 9 19:24:45 2005
CFD Solver wall clock seconds: 2.6900E+03

Execution terminating:
all RMS residual AND global imbalances
are below their target criteria.

```

=====
Boundary Flow and Total Source Term Summary
=====

```

```

+-----+-----+
|                U-Mom                |
+-----+-----+
Boundary   : entrada          -1.3041E-07
Boundary   : exterior         -7.8525E-06
Boundary   : interior         -2.1597E-05
Boundary   : salida           2.9866E-05
-----
Domain Imbalance :                2.8621E-07
Domain Imbalance, in %:            0.0001 %

```

```

+-----+-----+
|                V-Mom                |
+-----+-----+
Boundary   : entrada          -3.1253E-06
Boundary   : exterior         4.3675E-04
Boundary   : interior         -8.7603E-05
Boundary   : salida           -3.4421E-04
-----
Domain Imbalance :                1.8133E-06
Domain Imbalance, in %:            0.0006 %

```

```

+-----+-----+
|                W-Mom                |
+-----+-----+
Boundary   : entrada          2.8536E-01
Boundary   : exterior         -1.7855E-01
Boundary   : interior         -8.1368E-02

```

```

Boundary      : salida          -2.5947E-02
Domain Imbalance :              -5.0938E-04
Domain Imbalance, in %:          -0.1785 %

```

```

+-----+
|          P-Mass          |
+-----+
Boundary      : entrada          2.8149E-01
Boundary      : salida          -2.8860E-01
Domain Imbalance :              -7.1132E-03
Domain Imbalance, in %:          -2.4647 %

```

```

+-----+
|          H-Energy        |
+-----+
Boundary      : entrada          -2.5797E+03
Boundary      : exterior         1.4713E+03
Boundary      : interior        -3.0247E-02
Boundary      : salida           1.0268E+03
Domain Imbalance :              -8.1703E+01
Domain Imbalance, in %:          -3.1671 %

```

Wall Force and Moment Summary

Note: Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

```

+-----+
|          Pressure Force On Walls          |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
exterior        -1.1291E-05 -4.6754E-04  5.9283E-03
interior         8.9486E-06  5.7150E-05  1.4398E-04

```

```

+-----+
|          Viscous Force On Walls          |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
exterior         1.9183E-05  3.0961E-05  1.7262E-01
interior         1.2643E-05  3.0462E-05  8.1224E-02

```

```

+-----+
|          Pressure Moment On Walls          |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
exterior         8.8213E-04  4.9486E-05  2.9977E-08
interior        -9.6465E-05 -6.3699E-06 -4.7489E-09

```

```

+-----+
|          Viscous Moment On Walls          |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
exterior        -5.2891E-05  3.4173E-05 -2.3491E-08
interior        -4.7835E-05  5.0868E-06 -1.7155E-08

```

Locations of Maximum Residuals				
Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	10660	-7.147E-03	-1.734E-02	2.000E+00
V-Mom	10661	7.030E-03	-1.710E-02	2.000E+00
W-Mom	5524	-1.172E-02	-2.830E-02	2.000E+00
P-Mass	5511	7.548E-03	-7.548E-03	2.000E+00
H-Energy	433	-1.458E-02	-3.520E-02	1.977E+00

Peak Values of Residuals			
Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	2	3.29582E-04	3.12612E-06
V-Mom	2	3.38702E-04	3.03171E-06
W-Mom	1	1.91655E-01	1.21597E-05
P-Mass	2	3.30724E-04	2.02838E-06
H-Energy	1	7.11971E-02	9.42561E-05

False Transient Information		
Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	7.97501E+01
V-Mom	Auto	7.97501E+01
W-Mom	Auto	7.97501E+01
P-Mass	Auto	7.97501E+01
H-Energy	Auto	7.97501E+01

Average Scale Information	
---------------------------	--

Domain Name : Default Domain

Global Length	= 2.0512E-01
Minimum Extent	= 7.6200E-02
Maximum Extent	= 2.0000E+00
Density	= 8.4676E+02
Dynamic Viscosity	= 3.8504E-02
Velocity	= 6.5962E-02
Advection Time	= 3.1097E+00
Reynolds Number	= 2.9755E+02
Thermal Conductivity	= 1.4811E-01
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	= 1.9237E+03
Prandtl Number	= 5.0010E+02
Temperature Range	= 5.3053E+01

Variable Range Information		
----------------------------	--	--

Domain Name : Default Domain

Variable Name	min	max
Velocity u	-1.32E-02	1.32E-02
Velocity v	-1.33E-02	1.33E-02
Velocity w	5.27E-04	1.11E-01

```

| Pressure                | -1.31E-01 | 6.28E+01 |
| Density                 | 8.47E+02 | 8.47E+02 |
| Specific Heat Capacity at Constant Pressure| 1.91E+03 | 2.14E+03 |
| Dynamic Viscosity       | 7.98E-03 | 4.13E-02 |
| Thermal Conductivity    | 1.43E-01 | 1.48E-01 |
| Static Entropy          | -3.34E+01 | 2.99E+02 |
| Temperature             | 2.93E+02 | 3.46E+02 |
| Static Enthalpy         | -9.16E+03 | 9.80E+04 |
| Total Enthalpy          | -9.16E+03 | 9.80E+04 |
+-----+

```

```

+-----+
|           CPU Requirements of Numerical Solution           |
+-----+

```

Subsystem Name	Discretization		Linear Solution	
	(secs.)	%total	(secs.)	%total
Momentum and Mass	1.19E+03	44.6 %	6.77E+02	25.3 %
Heat Transfer	3.54E+02	13.3 %	8.63E+01	3.2 %
Subsystem Summary	1.55E+03	57.9 %	7.63E+02	28.6 %
Variable Updates	3.36E+02	12.6 %		
Miscellaneous	2.70E+01	1.0 %		
Total	2.67E+03			

```

+-----+
|           Job Information           |
+-----+

```

Host computer: EUROPA
Job finished: Thu Jun 9 19:24:54 2005
Total CPU time: 2.677E+03 seconds
or: (0: 0: 44: 36.625)
(Days: Hours: Minutes: Seconds)

Total wall clock time: 2.713E+03 seconds
or: (0: 0: 45: 13.000)
(Days: Hours: Minutes: Seconds)

End of solution stage.

```

+-----+
| The results from this run of the CFX-5 solver have been written to |
| c:\256\re100_001.res |
+-----+

```

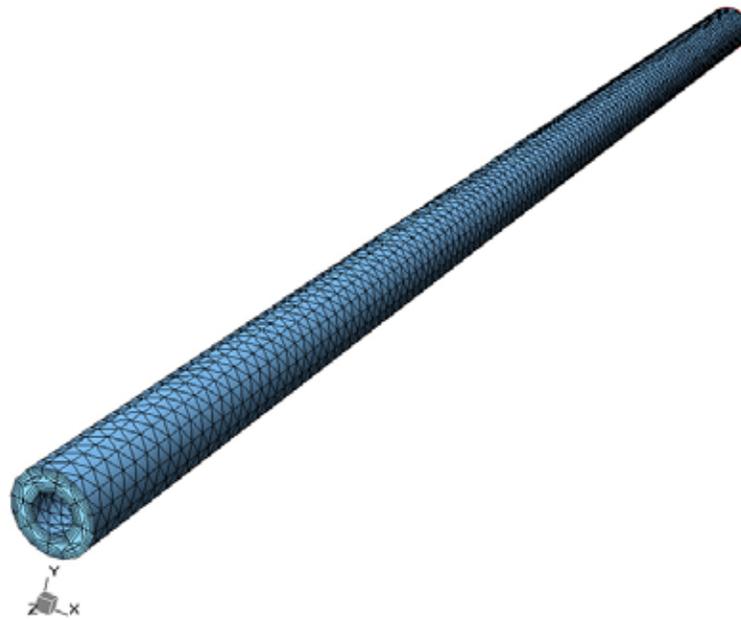
This run of the CFX-5 Solver has finished.

ANEXO 2 FRAGMENTO DEL ARCHIVO DE RESULTADOS PARA EL PROCESAMIENTO PARALELO

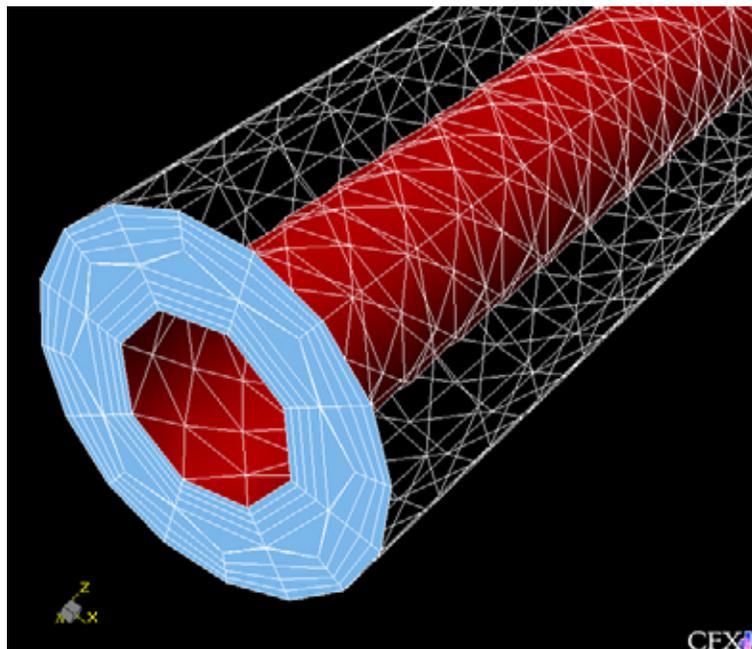
```
+-----+
|           Job Information           |
+-----+
Host computer: FOBOS
Par. Process: Master running on mesh partition: 1
Job finished: Fri May 27 07:50:45 2005
Total CPU time: 6.944E+02 seconds
              or: ( 0: 0: 11: 34.391 )
                  ( Days: Hours: Minutes: Seconds )
Host computer: DEIMOS
Par. Process: Slave running on mesh partition: 2
Job finished: Fri May 27 07:50:54 2005
Total CPU time: 6.322E+02 seconds
              or: ( 0: 0: 10: 32.188 )
                  ( Days: Hours: Minutes: Seconds )
Total wall clock time: 2.118E+03 seconds
              or: ( 0: 0: 35: 18.000 )
                  ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

--> Master-Partition Nr. 1 reaches final synchronization point!
--> Slave-Partition Nr. 2 reaches final synchronization point!
End of solution stage.
+-----+
| The results from this run of the CFX-5 solver have been written to |
| c:\2705050706\260505_005.res                                     |
+-----+
This run of the CFX-5 Solver has finished.
```

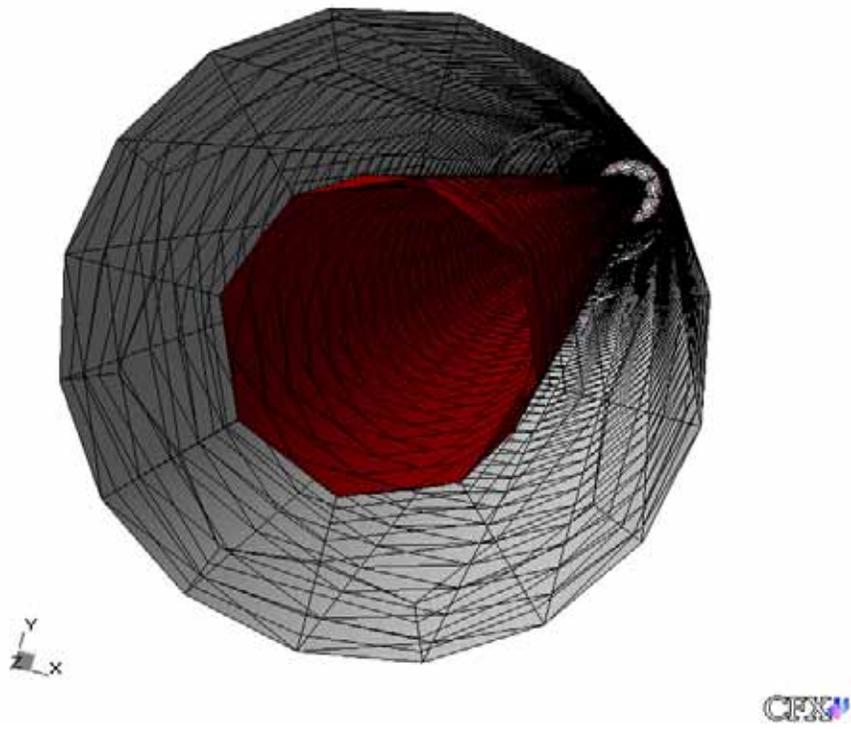
ANEXO 3 MALLA HÍBRIDA EMPLEADA



CFX



CFX



ANEXO 4 GRÁFICAS DE TEMPERATURA Y PRESIÓN

Las siguientes gráficas de temperatura y presión que se muestran a continuación pertenecen a un estudio adicional con las siguientes características:

Agua

$$T_i = 353,15\text{K}$$

$$T_{si} = 333,15\text{K}$$

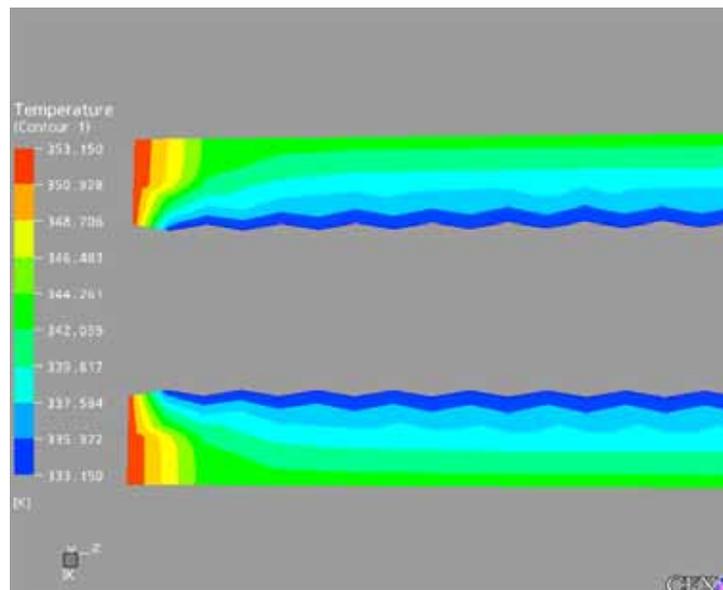
$$T_i = 343,15\text{K}$$

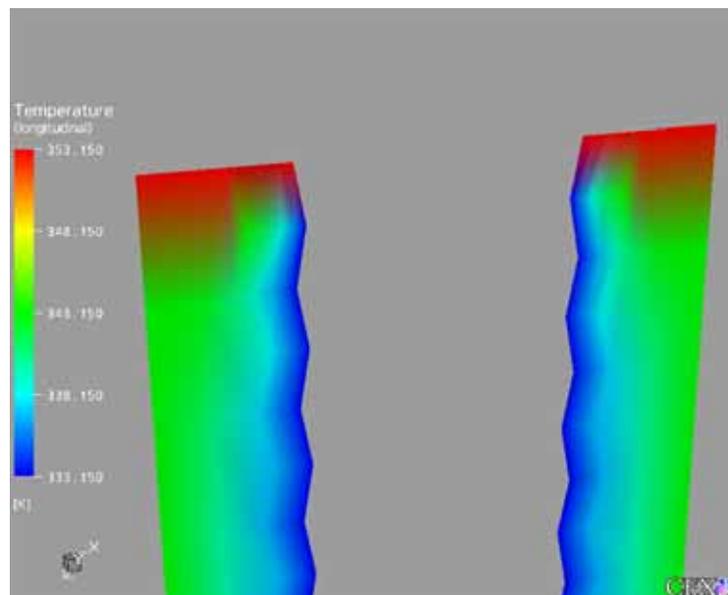
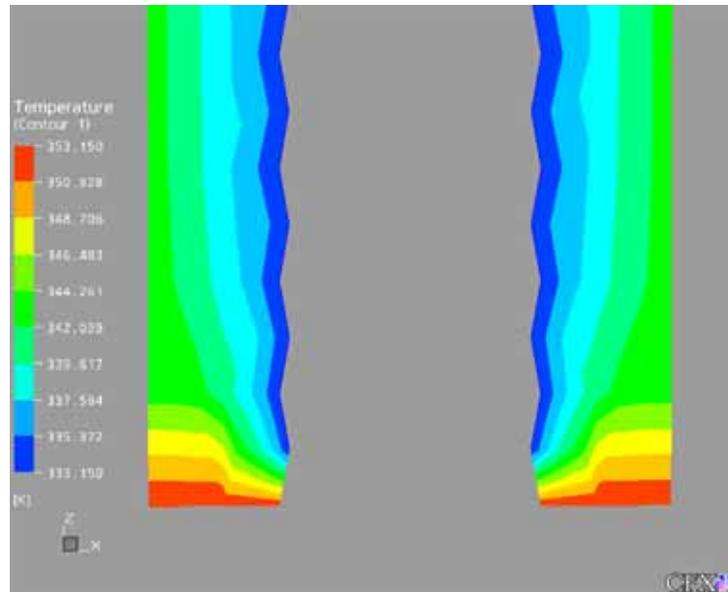
$$\text{Re} = 250$$

$$\frac{D_i}{D_o} = 0,5$$

$$L_z = 2,00\text{m}$$

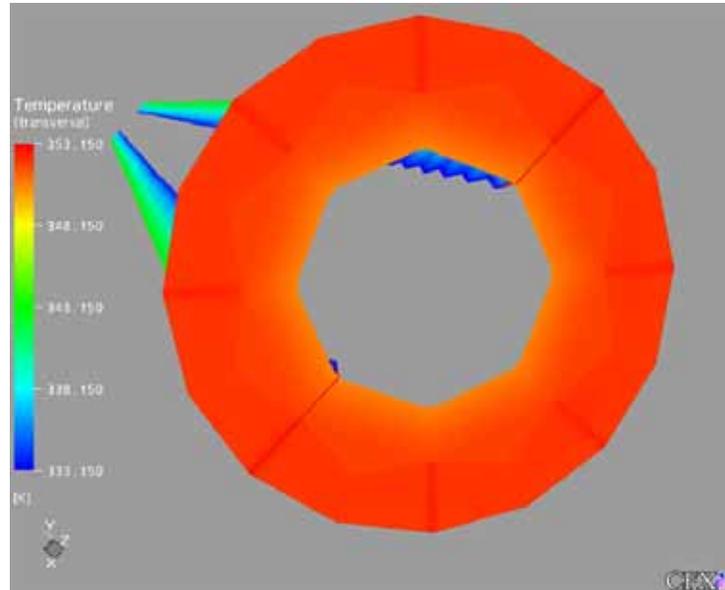
Planos de temperatura longitudinal



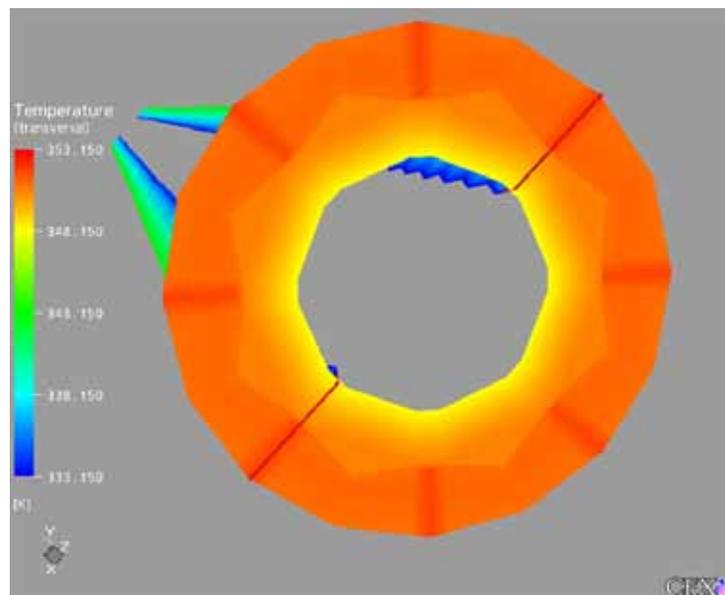


Planos de temperaturas transversales:

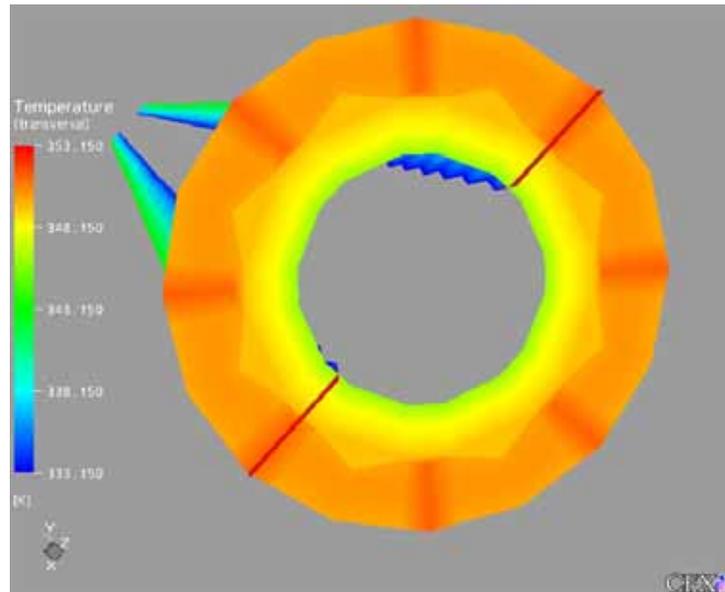
Z=0,01m



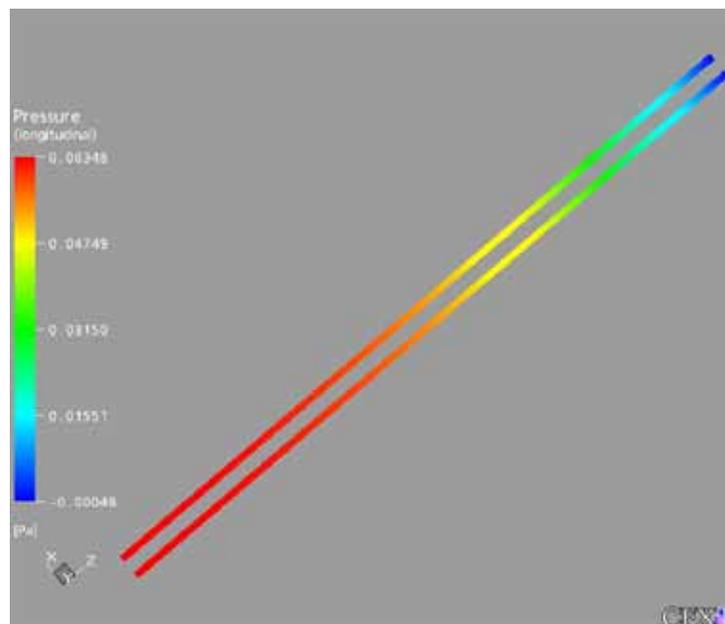
Z=0,02m



Z=0,03m



Plano de presión longitudinal



ANEXO 5 ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE SERVICIOS LINUX

/etc/smb.conf

```
workgroup = satelites
server string = servidor de archivos

[sharename]
comment = achivos en luna
path = /home
valid users = cfxuser, cfxuser1, cfxuser2, cfxuser3, cfxuser4
public = no
writable = yes
printable = no
create mask = 0765
```

/etc/exports:

```
/home 172.17.64.102(r,w) 172.17.64.103(r,w) 172.17.64.104(r,w) 172.17.64.105(r,w)
172.17.64.106(r,w)
```

/etc/host.allow:

```
portmap 172.17.64.102 172.17.64.103 172.17.64.104 172.17.64.105 172.17.64.106
172.17.64.107 172.17.64.108 172.17.64.109 172.17.64.110 172.17.64.111 172.17.64.112
```

/etc/host.deny:

```
All:All
```