

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**“ESTUDIO NUMÉRICO – EXPERIMENTAL DEL  
DESEMPEÑO DE SISTEMAS PASIVOS DE  
CLIMATIZACIÓN POR CONDUCTOS ENTERRADOS”**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por los Bachilleres  
Gómez D., Wilfredo  
Pérez F., Jorge D  
para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **“ESTUDIO NUMÉRICO – EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACIÓN POR CONDUCTOS ENTERRADOS”**

Tutores Académicos: Prof. Julio Segura

María E. Hobaica

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por los Bachilleres  
Gómez D., Wilfredo  
Pérez F., Jorge D.  
para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA



Caracas, 09 de junio de 2.009

## ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller:

**GOMEZ WILFREDO y PEREZ JORGE**

*Titulado:*

**“ESTUDIO NUMERICO-EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACION POR CONDUCTOS ENTERRADOS”,**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

**Prof. Josué León**  
Jurado



**Prof. María Elena Hobaica**  
Jurado

**Prof. Julio Segura**  
Tutor

“NÚCLEO DE INGENIERIA “ARMANDO MENDOZA” HACIA EL 30º ANIVERSARIO”

## DEDICATORIA

*A mis padres por ser el ejemplo a seguir en mi vida  
A mis hermanos por apoyarme siempre en todo momento  
A mi pareja por su comprensión y paciencia  
A mi compa Jorge, porque supimos enfrentar los retos juntos  
A todos mis amigos, que de una u otra manera intervinieron en este trabajo  
Es para Uds.*

*Wilfredo*

*A mis padres por enseñarme los valores realmente importantes y darme la fuerza,  
A mis hermanos por estar siempre allí,  
A todos mis tios que me abrieron un lugar en sus hogares  
Mis familiares y amigos*

*Jorge*

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer en primer lugar a Dios, por permitirnos llegar a donde estamos ahora.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por formarnos como Ingenieros y facilitar las instalaciones, a través de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para realizar este trabajo.

A los profesores Julio Segura y Ernesto L. Romero por guiarnos durante la elaboración de este Trabajo Especial de Grado y su disposición en todo momento.

Al Ing. Lucas de Andrade Kostetzer de ESSS, al Ing. Miguel Baritto, y al Ing. Juan Vásquez de Albatros Ingeniería, a todos por su gran colaboración en el soporte técnico que permitió la capacitación en el uso y entendimiento del software de CFD empleado.

Al Prof. Iván Saavedra, del IMF, por promover el uso del *cluster* de dicho instituto para la ejecución de las simulaciones.

Al Prof. Amador Hernández, y la Profa. Judith Fernández, de la Escuela de Hidrometeorología de la UCV-Caracas, y la Profa. Adriana Cortez de facultad de Agronomía UCV-Maracay, por los aportes climatológicos para el desarrollo de nuestro trabajo.

A nuestros compañeros durante la carrera,.....

Nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas que colaboraron con nosotros durante este proceso.

Gómez D., Wilfredo y Pérez F., Jorge D.

**ESTUDIO NUMÉRICO – EXPERIMENTAL DEL  
DESEMPEÑO DE SISTEMAS PASIVOS DE  
CLIMATIZACIÓN POR CONDUCTOS ENTERRADOS**

**Tutor Académico: Prof. Julio Segura. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009. 147 Pág.**

**Palabras Claves:** Conductos enterrados, intercambiadores tierra-aire, climatización pasiva, ahorro energético, diseño bioclimático, simulaciones computacionales.

En el presente trabajo se desarrolló un protocolo numérico basado en el método de volúmenes finitos basados en elementos, capaz de determinar el comportamiento de los intercambiadores térmicos tierra-aire, concebidos para climatización pasiva de espacios arquitectónicos, mediante conductos enterrados. Así mismo, y gracias al software ANSYS® CFX™ 11.0, se realizó y evaluó un modelo computarizado, basado en la discretización de dominios con mallas híbridas, que en conjunto con los datos suministrados al inicio de la simulación, permitió obtener, no sólo el comportamiento térmico, sino también el fluido-dinámico en régimen transitorio, de conductos enterrados de secciones de 102 y 152 mm de diámetro, y longitudes de 15 m y 30 m, permitiendo finalmente comparar para validar los resultados del modelo con las mediciones experimentales.

Gómez D., Wilfredo y Pérez F., Jorge D.

**NUMERICAL STUDY - EXPERIMENTAL OF THE  
PERFORMANCE OF PASIVE SYSTEMS OF AIR  
CONDITIONING BY BURIED CONDUITS**

**Academic Tutor: Prof. Julio Segura. Caracas, U.C.P. Faculty of  
Engineering, School of Mechanical Engineering. 2009. 147 p.**

**Key words:** Buried conduits, interchanging conduits surface-air, passive air conditioning, power saving, bio-climatic design, computer simulations.

In the present work a numerical protocol based on the method of finite volumes based on elements was developed, able to determine the behavior of the thermal interchangers surface-air, conceived for passive air conditioning of architectonic spaces, by means of buried conduits. Also, and thanks to software ANSYS® CFX™ 11,0, a computerized model, based on the discretización of dominions was realised and evaluated with hybrid mesh, that altogether with the data provided at the beginning of the simulation, allowed to obtain, not only the thermal behavior, but also the fluid-dynamic in transient state, of buried conduits of sections of 102 and 152 mm of diameter, and lengths of 15 m and 30 m, allowing finally to compare to validate the results of the model with the experimental measurements.



## NOMENCLATURA Y SÍMBOLOS

A: área

atm: atmósfera

C<sub>p</sub>: calor específico a presión constante

°C: grados centígrados

cm: centímetros

D: diámetro del conducto circular

g: aceleración de la gravedad

h: hora

J: Joule

K: Kelvin

k: conductividad térmica

kg: kilogramos

m: metros

mm: milímetros

$\dot{m}$ : flujo másico

p: presión

Pa: pascales

q: tasa de flujo de calor

S: término fuente

s: segundos

t: tiempo

u: componente de la velocidad en la dirección x

v: componente de la velocidad en la dirección y

V: velocidad

w: componente de la velocidad en la dirección z

W: Watios

**Símbolos griegos:**

$\mu$  : viscosidad dinámica

$\mu$  m: micrómetros

$\emptyset$ : propiedad de la ecuación general de conservación

$\rho$ : densidad

$\Gamma$ : coeficiente de difusión de la ecuación general de conservación

$\Phi$ : disipación viscosa

**Subíndices:**

x: referente a la dirección x

y: referente a la dirección y

z: referente a la dirección z

## ÍNDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS .....	xiii
LISTA DE FIGURAS .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
Planteamiento del Problema.....	5
Objetivo General .....	6
Objetivos Específicos.....	6
Antecedentes .....	7
CAPITULO I Fundamento Teórico .....	9
1.1 Sistemas pasivos de climatización .....	9
1.1.1 Sistema evaporativo de enfriamiento .....	11
1.1.2 Sistema radiativo de enfriamiento.....	12
1.1.3 Sistema de enfriamiento por contacto con el suelo.....	13
1.2 Sistemas pasivo de climatización por conductos enterrados.....	14
1.3 Variables a considerar para el diseño de sistemas pasivos por conductos enterrados .....	16
1.3.1 Aspectos técnicos de diseño.....	17
1.4 Antecedentes de los sistemas pasivos de climatización en Venezuela .....	25
1.5 Conducción .....	28
1.5.1 Conducción en régimen transitorio. Sólido semi-infinito .....	29
1.6 Convección.....	29
1.7 La temperatura del aire como resultante de los procesos de superficie .....	30
CAPITULO II Marco Metodológico .....	34
2.1 Limitaciones .....	35
CAPITULO III Métodos de Volúmenes Finitos.....	38
3.1 Ecuación de conservación.....	38
3.2 Malla de computo.....	39

3.3 Mallas estructuradas vs mallas no estructuradas.....	40
3.4 Discretización e integración de las ecuaciones .....	42
3.5 Método de volúmenes finitos basados en elementos .....	43
CAPITULO IV Simulaciones Computacionales .....	50
4.1 Proceso de diseño del modelo .....	47
4.2 Proceso del mallado del modelo .....	51
4.3 Proceso de simulación CFD con malla .....	54
4.3.1 CFX-Pre™ .....	54
4.3.2 CFX-Solver™ .....	69
4.3.3 CFX-Post™ .....	72
4.4 Recurso computacional utilizado .....	73
CAPITULO V Validación del Modelo .....	79
5.1 Comportamiento térmico de la tierra .....	86
5.2 Comportamiento fluido-dinámico del aire .....	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
APENDICE .....	120

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Conductividad térmica de los suelos.....	21
Tabla 1.2 Zonas climáticas para el diseño de edificaciones en Venezuela.....	23
Tabla 3.1 Términos a sustituir en la forma general de la ecuación de conservación .....	39
Tabla 4.1 Tabla de codos tubería .....	49
Tabla 4.2 Tabla de valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.....	64
Tabla 5.1 Resultados temperatura de salida.....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Sistemas de enfriamiento evaporativo directo e indirecto.....	12
Figura 1-2 Sistema de enfriamiento radiativo.....	13
Figura 1-3 Sistemas de enfriamiento por contacto por el suelo.....	14
Figura 1-4 Factores de cobertura de las cuatro técnicas evaluadas en las seis ciudades seleccionadas.....	26
Figura 1-5 Condición diurna .....	30
Figura 1-6 Condición nocturna .....	31
Figura 2-1 Esquema ANSYS® CFX™.....	33
Figura 3-1 Elementos y volumen de control de una malla de computo .....	40
Figura 3-2 Mallas de computo. ....	41
Figura 3-3 Malla de cómputo: Híbridas.....	42
Figura 3-4 Sub-volúmenes de control de una malla de cálculo .....	44
Figura 3-5 Coordenadas locales a un elemento.....	46
Figura 4-1 Trazos de diámetro de tubería. ANSYS® WorkBench™.....	48
Figura 4-2 Trazos de longitud de tubería. ANSYS® WorkBench™.....	49
Figura 4-3 Dibujo de codos relacionado con tabla codos tuberías.....	50
Figura 4-4 Superficie de tubería. ANSYS® WorkBench™ .....	50
Figura 4-5 Modelo de tierra-flujo armado. ANSYS® WorkBench™ .....	51
Figura 4-6 Ambiente CFX-Mesh™. ANSYS® WorkBench™ .....	51
Figura 4-7 Malla combinada y malla desestructurada. ANSYS® WorkBench™.....	52
Figura 4-8 Ventanas de modificación de propiedades de elementos. ANSYS® WorkBench™ .....	52
Figura 4-9 Mallado final del modelo. ANSYS® WorkBench™ .....	53
Figura 4-10 Detalle del mallado en flujo. ANSYS® WorkBench™ .....	54
Figura 4-11 Ambiente de trabajo. ANSYS® CFX™ .....	55
Figura 4-12 Ventana tipo de simulación. ANSYS® CFX™ .....	58

Figura 4-13 Definición de condiciones de borde. ANSYS® CFX™ .....	59
Figura 4-14 Ventana detalles de dominio. ANSYS® CFX™ .....	59
Figura 4-15 Ventana detalles de sub-dominio. ANSYS® CFX™.....	60
Figura 4-16 Ventana de modificación del control del Solver-Manager™ ANSYS® CFX™.....	66
Figura 4-17 Ventana de modificación del control de data de salida. ANSYS® CFX™ .....	67
Figura 4-18 Ventana de modificación de propiedades de material. ANSYS® CFX™ .....	68
Figura 4-19 Ventana de creación de expresión “FLUJOCALOR”. ANSYS® CFX™ .....	68
Figura 4-20 Ventana de creación de expresión “TEMP AIRE”. ANSYS® CFX™ .....	69
Figura 4-21 Cálculo de margen de error, para ecuación de continuidad y <i>momentum</i> . ANSYS® CFX™ .....	70
Figura 4-22 Cálculo de margen de error, para ecuación de energía. ANSYS® CFX™ .....	71
Figura 4-23 Cálculo de margen de error, para turbulencia. ANSYS® CFX™ .....	72
Figura 4-24 Ventana de visualización de resultados obtenidos. ANSYS® CFX™ ....	73
Figura 5-1 Temperatura aire de entrada .....	77
Figura 5-2 Temperatura de aire de salida para conducto D:102 mm, L: 15 m .....	80
Figura 5-3 Temperatura de aire de salida para conducto D:152 mm, L: 15 m .....	81
Figura 5-4 Temperatura de aire de salida para conducto D:102 mm, L: 30 m .....	82
Figura 5-5 Comparación temperatura de aire de salida con temperatura exterior, de ANSYS® CFX™ .....	84
Figura 5-6 Comparación temperatura de aire de salida con temperatura exterior, de Laurel.....	85
Figura 5-7 Comportamiento térmico del suelo. ANSYS® CFX™.....	86
Figura 5-8 Comportamiento térmico del suelo. Sánchez, 1991 .....	87

Figura 5-9 Velocidad de fluido.....	88
Figura 5-10 Velocidad del aire en codo de entrada.....	89
Figura 5-11 Velocidad del aire en codo de salida.....	90
Figura 5-12 Perfil desarrollado de la velocidad .....	91



## INTRODUCCIÓN

Los procesos tradicionales de generación de energía eléctrica consisten en quemar combustibles fósiles para generar calor, trayendo como consecuencia, una serie de alteraciones ambientales difícilmente reversibles y con efectos no del todo conocidos. Ejemplo claro de esto, es el cambio climático por efecto invernadero, el cual está llegando a ser considerado como una de las mayores amenazas a corto y mediano plazo que tiene la humanidad. El incremento de los gases causantes de tal efecto (provenientes principalmente de la combustión de combustibles fósiles), dificultan la radiación de la energía proveniente de sol al espacio, lo que ocasiona un calentamiento global que distorsiona las condiciones de equilibrio del planeta.

Según el informe de Statistical Review of World Energy 2007, de British Petroleum, alrededor del 40% de la energía total consumida se destina a las edificaciones, y se estima, que como consecuencia del aumento general del nivel de vida, se demandará cada vez más servicios, lo cual se traducirá en los países tropicales como el nuestro, en un incremento en las instalaciones de climatización artificial. Si a esto le sumamos la carencia de inversiones en el sector eléctrico nacional, puesto en evidencia con los actuales problemas de abastecimiento, quedará claro entonces la importancia de reducir el consumo ahorrando energía.

En dicho contexto, el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC-FAU-UCV), en conjunto con la Universidad de la Rochelle (Francia), ha venido desarrollado una línea de investigación orientada al desarrollo de sistemas pasivos de climatización dentro de las variables

climáticas de nuestro país, destacando, por su potencial de aplicación, los sistemas de climatización por conductos enterrados.

Este sistema consiste en aprovechar la diferencia de temperatura entre el aire del ambiente exterior y la tierra a poca profundidad, de manera que se transfiera calor del aire a la tierra cuando pasa por los conductos enterrados. Esto permite reducir sustancialmente el consumo energético que supondría acondicionar el aire con los sistemas activos tradicionales, ya que sólo se necesita un ventilador para forzar el flujo de aire a través del sistema, a diferencia de los primeros, donde el consumo energético es principalmente atribuible al compresor del refrigerante.

Posteriormente se crearon convenios para desarrollar líneas de investigación entre IDEC y la escuela de ingeniería mecánica. En conversaciones con el Prof. Ernesto Lorenzo, Profesor Investigador del IDEC, nos planteamos el reto de contribuir en forma específica con el desarrollo del sistema pasivo por conductos enterrados, con la creación de un protocolo de cálculo, que mediante una simulación computarizada, permitiera predecir el comportamiento del sistema. Para la obtención de las variables climáticas y físicas necesarias para la posterior simulación del modelo, se tuvo acceso a un prototipo del sistema, construido en la planta experimental del IDEC en el Laurel, el cual está conformado por tres tuberías de diferentes diámetros y longitudes.

Por consiguiente, a partir de dicha línea de investigación, en este primer trabajo se desarrollan simulaciones computacionales ANSYS® CFX™, que permiten predecir el comportamiento fluido-dinámico y térmico, en régimen transitorio, de este sistema pasivo de climatización, simulando la distribución de temperaturas en el interior del modelo a estudiar y constituye un modelo

tridimensional basado en el método de los volúmenes finitos, con mallas híbridas (estructuras y desestructuras en conjunto).

Inicialmente se tenía previsto en los objetivos, analizar también el comportamiento termodinámico de estos sistemas por conductos enterrados, donde se estudiaría la variable humedad relativa del aire y a su vez observar si existe condensación dentro del sistema a evaluar, pero debido a la complejidad del modelo, no se pudo estudiar este comportamiento. Se deja como otro trabajo de investigación la cual se analizará el fenómeno flujo bifásico para este caso específico. Así mismo, en la búsqueda de lograr validar el protocolo de cálculo propuesto, se realizaron simulaciones con tubos de diferentes diámetros y longitudes, comparando luego los resultados con los datos experimentales del prototipo realizado en el Laurel.

El presente trabajo consta de cinco capítulos que abarcan todo el esquema de nuestra investigación.

El primero trata sobre los sistemas pasivos de climatización, tipos más utilizados en edificaciones, conductos enterrados que es el sistema pasivo utilizado en nuestra investigación, como fundamento teórico del mismo y para finalizar experiencias de estos sistemas en Venezuela. Seguidamente en nuestro segundo capítulo, se describe la metodología utilizada, la cual se toma en consideración las suposiciones, análisis y estudios realizados para llevar a cabo nuestro modelo numérico-experimental, indicando de manera explícita cada una de las propiedades estudiadas.

En el capítulo 3 y 4, se explica el método de volúmenes finito (FVM) y las simulaciones computacionales utilizadas para manipular el modelo a estudiar, la cual es necesario recurrir a una herramienta computacional que permita resolver y

graficar lo desarrollado en el mismo, por lo cual es utilizado el programa ANSYS® CFX™ es un software (propietario) de CFD (Dinámica de Fluidos Computacionales) de la empresa norteamericana ANSYS®, que fue desarrollado por la empresa británica AEA Technology, la cual utilizan una variante denominada como Método de Volúmenes Finitos en Elementos (EbFVM), donde la malla puede ser estructurada o desestructurada. Dicho software utiliza métodos numéricos para resolver el sistema de ecuaciones de conservación, energía y momento; y así obtener los resultados de las simulaciones, para lograr los objetivos. Cabe destacar que las simulaciones fueron ejecutadas por el cluster del IMF-UCV.

Finalmente, en el capítulo 5, se realiza un análisis y comparación de los resultados arrojados por la aplicación del protocolo de cálculo, en contraposición con los obtenidos por el Prof. Ernesto Lorenzo, en el prototipo experimental del sistema. Con el fin de obtener los márgenes de error y validar la herramienta.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente se busca estudiar novedosas maneras de obtener ambientes climáticamente confortables por diversos medios, en pro de racionalizar el uso y también de evitar el abuso de la climatización activa, para así contribuir con la disminución del gasto energético.

Con esta idea, un conjunto de técnicas están basadas en el diseño bioclimático, logrando especial relevancia los sistemas pasivos de climatización, los cuales tiene como objetivo principal, mejorar el comportamiento climático de las edificaciones, actuando sobre los fenómenos termodinámicos y de movimiento del aire.

La climatización pasiva en general se basa en la 2 ley de la termodinámica, esta indica que el modo natural de fluir el calor es del foco caliente al foco frío. Por tanto para que un edificio, de modo natural, pierda calor debe ser el foco caliente con respecto a algún foco frío, o viceversa según sean los requerimientos. En el caso práctico el foco frío puede ser una temperatura real, como la temperatura del suelo a determinada profundidad, o también una temperatura hipotética, siendo ésta la temperatura mínima que puede alcanzar el fluido portador de calor, que en este caso es el aire, a la salida del sistema de climatización.

Finalmente se verificará el desempeño del sistema, sabiendo que dependen fundamentalmente de la diferencia de temperatura entre el aire del ambiente y la fuente de enfriamiento, la intensidad del flujo térmico disponible en la fuente de enfriamiento, la posibilidad de evacuar de la fuente de enfriamiento el calor que le es transferido, de manera que se mantenga su temperatura a un nivel lo suficientemente bajo durante un período de tiempo

conveniente. Para esto, se busca analizar un sistema pasivo de climatización, por conductos enterrados, que incida en el ambiente y de esta manera mejorar sus condiciones.

Se busca resolver el problema del cálculo del flujo de calor entre conductos por los que circula aire y el suelo en donde los conductos están enterrados. Esta situación surge en aplicaciones en donde se aprovecha el suelo como sumidero de calor. En este trabajo se desarrollarán simulaciones computacionales apropiadas para resolver el problema del acoplamiento térmico entre los conductos y el suelo de manera tal que puedan utilizarse en la simulación de sistemas que utilicen a aquel como sumidero de calor.

### **Objetivo General**

Analizar, mediante simulaciones computacionales y con el método numérico de volúmenes finitos, el comportamiento termodinámico, fluidodinámico y térmico de sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados, y validar los resultados con datos de un modelo experimental disponibles.

### **Objetivos Específicos**

- Recopilar información sobre el sistema a estudiar.
- Estudiar el desempeño de los conductos enterrados, y su potencial para el confort térmico.
- Evaluar influencia de distintas variables como: Diseño de los tubos, abarcando diámetro, longitud, profundidad de entierro, material, temperatura y humedad relativa del aire de circulación

### **Antecedentes:**

- **Fontalvo y Silva (2009):** Desarrollaron un modelo físico matemático simplificado para el diseño de sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados, a su vez elaboraron una herramienta computacional con base en un sistema de algebra (y cálculo) por computadora, que facilitó su utilización. Ésta herramienta permitió predecir el comportamiento térmico, así como el fluido dinámico y termodinámico, de un arreglo de conductos enterrados dado, pudiendo igualmente suministrar, en base a ciertos datos iniciales, la temperatura del aire a la salida de los conductos, la caída de presión según el recorrido y la condensación producida.
- **Lorenzo (2007):** Desarrolló la aplicación de la tecnología de acondicionamiento térmico pasivo de aire por conductos enterrados como alternativa frente a los sistemas activos tradicionales de climatización de espacios, realizó un prototipo del sistema para obtener mediciones reales en clima cálido-húmedo, y basándose en dichas mediciones proyectó un sistema de este tipo para un almacén de bebidas alcohólicas y gaseosas (Almacenes L&G).
- **Ramírez (2005a):** desarrolló en Colombia un proyecto de aplicación del sistema de conductos enterrados para pre enfriar el aire a la entrada de las unidades de aire acondicionado. El proyecto fue aplicado en una tienda por departamentos de la cadena comercial ALKosto.
- **Hollmuller, et al. (2005):** evaluaron el comportamiento térmico de un edificio residencial de 4 pisos ubicado en San Pablo, Brasil. Utilizando un sistema de tubos de 8 '' de diámetro y 30 m de longitud lograron una disminución de 7°C durante el día y un aumento de 3°C durante la noche, en una habitación principal de 60m<sup>3</sup> de volumen.

- **Ramírez (2005b):** Realizó el diseño de un sistema de climatización por tubos enterrados para su aplicación en un almacén de productos farmacéuticos en Santiago de Chile, Chile. Se logró una reducción de 9,6 veces la inversión en comparación con una solución tradicional de climatización de aire y un ahorro de 96,1% en el consumo energético mensual.
- **Silvana, et al. (2002):** Aplicaron el sistema de conductos enterrados en una escuela en básica de estudios primarios en la ciudad de Catriló en Argentina, utilizando un conducto rectangular de 40 x 65 cm de 29 m de longitud, enterrado a 40 cm de profundidad, para climatizar un laboratorio de 167m<sup>3</sup> de volumen logrando enfriar el aire 9°C durante el día y calentarlo 5°C durante la noche.
- **Hobaica, et al. (2001):** Llevaron un estudio conjunto, que logró avances importantes respecto a evaluaciones del potencial climático de algunos de estos sistemas pasivos de climatización, así como su relación con el confort global en las zonas climáticas más representativas del país.



# **CAPITULO I**

## **FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **1.1- Sistemas pasivos de climatización**

Existen varias definiciones para sistema pasivo. El término pasivo se empezó aplicar hace sólo unos cuantos años a aquellos sistemas de climatización ambiental que, en contraste con los complejos y sofisticados equipos de aire acondicionado o calefacción modernos, resultaban muy simples, tanto en concepto como en funcionamiento y mantenimiento; de hecho tratan de ser lo menos dependientes posible de equipos auxiliares convencionales de apoyo (bombas, ventiladores, condensadores), siendo, en la mayoría de los casos, totalmente independientes de éstos.

En consecuencia, los sistemas pasivos de climatización se caracterizan por la nula dependencia de energéticos convencionales, como los de origen fósil, contribuyendo de manera contundente al ahorro y uso eficiente de los recursos no renovables.

Además se caracterizan por formar parte de la estructura misma de la edificación, aunque acoplados de tal manera a las características del medio ambiente, que pueden captar, bloquear, transferir, almacenar o descargar energía en forma natural y casi siempre auto-regulable, según el proceso de climatización implicado.

Una buena "climatización pasiva" ayuda a gestionar con eficiencia la temperatura interior de las edificaciones. Así, el consumo de energía necesario para conseguir un ambiente agradable se reduce al mínimo.

Los sistemas de climatización pasiva, se basan en conceptos básicos de la Termodinámica, cuyas leyes explican el modo natural de fluir la energía (Holman, 1999). Potenciar los sistemas pasivos, en definitiva, supone caminar hacia una climatización menos artificial.

Con una adecuada integración de estos principios se puede lograr una alternativa a las convencionales técnicas de climatización como el aire acondicionado y los distintos sistemas de calefacción, que no sólo tiene por objetivo el ahorro de energías y la reducción del gasto económico, sino también el cuidado del medio ambiente.

La clasificación por requerimientos de climatización es el resultado del estudio del bioclima del lugar, consistente en:

- Control térmico
  - Calentamiento
  - Enfriamiento
- Control de humedad
  - Humidificación
  - Des humidificación
- Control solar
  - Protección
  - Captación

Los métodos evaporativo, radiativo y de contacto con el suelo son los sistemas pasivos de calentamiento y enfriamiento más utilizados en las construcciones. Para nuestro caso de estudio nos interesa aplicar estos métodos como sistemas pasivos de climatización de enfriamiento, debido al clima venezolano predominante.

### **1.1.1- Sistema evaporativo de enfriamiento**

El enfriamiento evaporativo es un proceso de transferencia de calor y masa basado en la conversión del calor sensible en latente. El aire no saturado es enfriado por la evaporación de agua sin intercambio de energía con el entorno. En estas condiciones, parte de la carga de calor sensible del aire se convierte en calor latente para la evaporación del agua, consiguiendo reducir la temperatura seca del aire mediante un aumento de su humedad. Este intercambio de calor sensible y latente idealmente tiene lugar hasta que el aire se satura y la temperatura del aire y el agua se igualan alcanzando el valor de la temperatura de saturación adiabática.

El enfriamiento evaporativo es una opción para lograr las condiciones de comodidad térmica en los edificios, tanto los habitados por humanos, como los de explotación pecuaria.

El sistema evaporativo puede ser configurado para funcionar de manera directa (el agua se evapora directamente en una corriente de aire aumentando su humedad), e indirecta (el agua se evapora en una corriente secundaria, la cual intercambia calor sensible con la corriente primaria, que de este modo no recibe ninguna humedad).

En la arquitectura tradicional, existieron numerosos ejemplos de enfriadores de espacios a partir de la evaporación de agua sobre superficies húmedas, saltos de esta, o espejos de agua.

Los sistemas enfriadores en los edificios, varían en forma y disposición, pero en esencia son sistemas que presentan un espejo de agua, una superficie húmeda o un chorro de agua. En todos los casos es necesario que exista el recurso viento en el ambiente, para promover mediante vanos la circulación del aire dentro del edificio, alrededor del dispositivo enfriador y finalmente hacia el espacio o el usuario a enfriar.

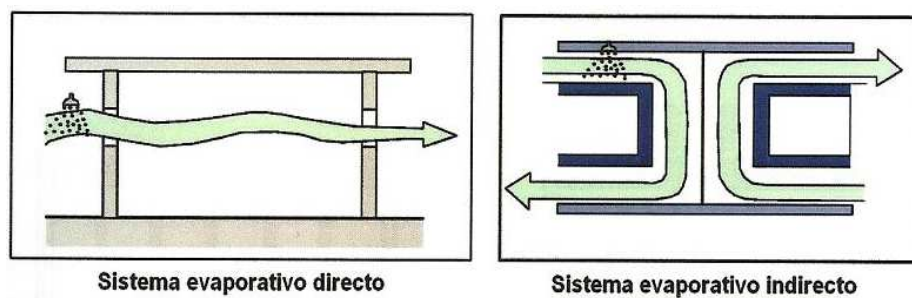


Figura 1-1 Sistemas de enfriamiento evaporativo directo e indirecto

Fuente: Prof. Lorenzo Ernesto (2008) Climatización pasiva por conductos enterrados. IDEC-FAC-UCV.

### 1.1.2- Sistema radiativo de enfriamiento

El interés de enfriar las edificaciones, en búsqueda de condiciones de confort para el ser humano, ha encontrado en el enfriamiento radiativo un medio natural con potencial para lograr tal fin. El enfriamiento pasivo de edificaciones mediante la utilización de sistemas basados en el enfriamiento radiativo a motivado numerosas investigaciones en las últimas décadas.

Un sistema pasivo de enfriamiento radiativo es aquel capaz de captar, almacenar y distribuir el “frío”, sin suministro de energía convencional; esto es, sin la utilización de dispositivos electromecánicos de alto consumo energético. Esto último no excluye la posibilidad de incorporar pequeños equipos, como por ejemplo, ventiladores, que permitan ocasionalmente activar o mejorar los intercambios de calor dentro del sistema o entre el sistema y el ambiente exterior.

En el caso del enfriamiento radiante, la capacidad de “captar frío” debe entenderse como la capacidad de emitir fácilmente radiación de onda larga. El sistema deberá contemplar, en primer lugar, la utilización de una parte de la edificación y de un tipo de material, que garantice una alta pérdida de calor por radiación, durante las horas nocturnas.

El componente de la edificación más recomendado para utilizar como superficie radiadora es el techo. Una superficie horizontal o con poca pendiente, resulta ser la orientación más ventajosa para “ver” el cielo. Las paredes, contrariamente al techo, presentan poco potencial de enfriamiento al estar enfrentadas a otras edificaciones y contar con ángulos sólidos de visión del cielo muy reducidos y amplios ángulos cenitales.

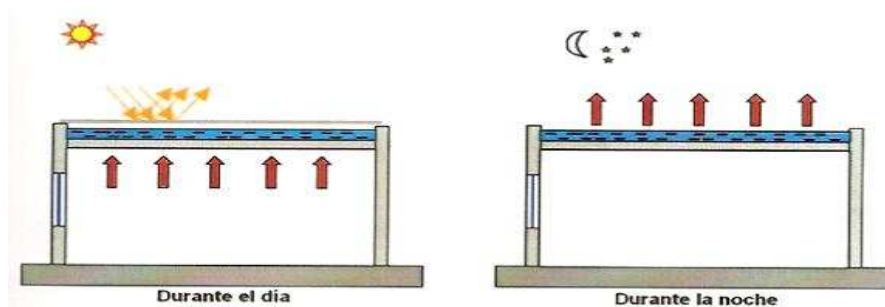


Figura 1-2. Sistema de enfriamiento radiativo

Fuente: Prof. Lorenzo Ernesto (2008) Climatización pasiva por conductos enterrados  
IDEC-FAC-UCV

### 1.1.3- Sistemas de enfriamiento por contacto con el suelo

El principio de este tipo de sistema por contacto con el suelo, es básicamente la disipación de calor hacia la tierra, la cual su temperatura aproximadamente de 1,5 a 3 metros de profundidad, es cercana al promedio de la temperatura anual de la zona y a su vez sensiblemente menor que la del ambiente en horas de mayor temperatura.

Existe un sistema de enfriamiento directo, consiste en aprovechar esta temperatura, enterrando parcialmente la edificación, así creando paredes frescas cuya masa térmica se incorpora a la del terreno, reduciendo la temperatura radiante y disipando el calor generado en los espacios hacia en terreno.

Tenemos el sistema por conductos enterrados, se basa en enterrar una serie de conductos o tubos, preferiblemente de alta conductividad térmica como de arcilla, cemento, metálicos, otros; por la cual fluye cierto caudal de aire tomado del exterior de las edificaciones para luego salir a una temperatura menor en el interior de la edificación.

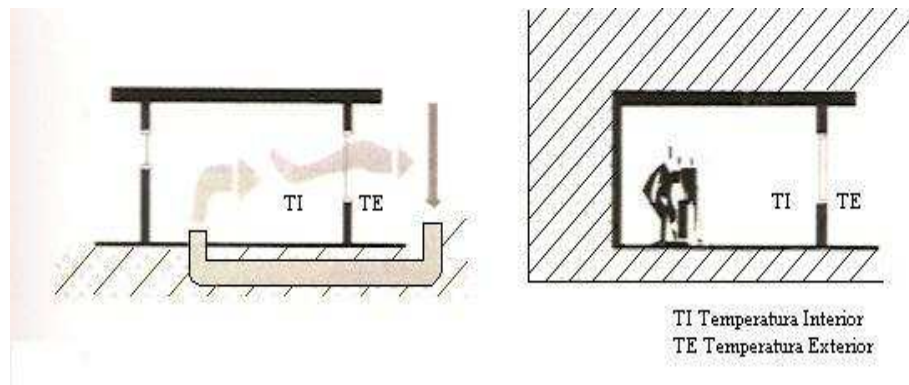


Figura 1-3. Sistemas de enfriamiento por contacto por el suelo

Fuente: Prof. Lorenzo Ernesto (2008) Climatización pasiva por conductos enterrados

IDEC-FAC-UCV

## **1.2- Sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados**

Existen sistemas especiales de enfriamiento o calentamiento pasivo, los cuales, si bien obligan al tratamiento de algunos de los aspectos señalados, pueden entenderse como instalaciones de climatización autónomas. Los mismos se enfocan en uno o varios de los mecanismos de intercambio y propagación de calor (conducción, convección, radiación, evaporación, almacenamiento) a fin de acentuarlos y aprovecharlos.

Los sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados o también llamados Intercambiadores de calor tierra-aire, se basan en la utilización de la energía térmica del subsuelo para pre tratar el aire de ventilación de los edificios. Así el aire obtenido presenta un mayor grado de confort térmico al obtener un aire más cálido del habitual en un tiempo frío o más fresco en uno caluroso.

El enfriamiento por el suelo se basa en que, luego de cierta profundidad, el terreno mantiene una temperatura similar a la media del aire de la zona. Ello permite disipar en el terreno el calor del aire cuando el aire esté más caliente o tomar calor del terreno y transferirlo al aire cuando el aire esté más frío.

El sistema por conductos enterrados, el cual consiste en tubos colocados aproximadamente de 1,5 a 3 metros de profundidad, dentro de los cuales se hace circular el aire de la zona. De esa forma se le enfría o se le calienta por medio de la convección que se da entre el aire y las superficies de los tubos. El aire se aspira con un ventilador y se inyecta al ambiente después de tratado. La disminución o aumento de la temperatura del aire en el tubo depende de varios factores: la temperatura del aire a la entrada, la temperatura del suelo a la profundidad de los tubos, la difusividad del suelo, la velocidad del aire en los

tubos, así como las dimensiones de los tubos. Para que el sistema sea eficaz la temperatura del suelo debe ser al menos 6 °C distinta de la del aire.<sup>1</sup>

### **1.3- Variables a considerar para el diseño de sistemas pasivos por conductos enterrados en la climatización pasiva de edificaciones**

El diseño pasivo o bioclimático, se le entiende como un conjunto de procedimientos de diseño urbano y arquitectónico orientado a crear entre las edificaciones y el clima una interacción energética natural que dé como resultado espacios térmicamente confortables y/o de nula o mínima necesidad de sistemas activos de climatización.

La transferencia energética se da entre los espacios de las edificaciones y el exterior a través de la envolvente (conjunto de componentes y subcomponentes que actúan como un filtro de los flujos energéticos entre el exterior y el interior) y entre los espacios de una misma edificación a través de las divisiones internas.

La meta del diseño pasivo es operar sobre dichas transferencias con el fin de obtener confort térmico, esto incluye los techos, las fachadas, las ventanas, las puertas, los marcos y cualquier elemento que separe al interior del exterior. Por otra parte, si bien las divisiones internas pueden verse como un “segundo nivel” de envolvente, se les diferenciará de ésta en razón de que la interacción no se da directamente con el clima sino entre espacios ya afectados por la envolvente.

---

<sup>1</sup>(Fuente: Escuer, Joan, Geoconsultores Técnicos y Ambientales)



En líneas generales, en climas cálidos que es el caso a estudiar en el presente trabajo especial de grado, el diseño pasivo consistirá en crear confort térmico introduciendo aire a temperaturas agradables al ser humano y expulsarlo cuando sea necesario.

Por definición, el diseño pasivo se refiere al diseño de edificaciones que no serán climatizadas con equipos de aire acondicionado o calefacción, y serán utilizadas igualmente para minimizar el gasto energético y contribuir con el medio ambiente.

El diseño pasivo se puede abordar con arreglo a los aspectos generales que se enumeran a continuación.

1. Contexto climático y entorno
2. Uso de la edificación
3. Pautas de diseño pasivo:
  - 3.1. Envolverte
  - 3.2. Divisiones internas
  - 3.3. Distribución espacial
4. Sistemas específicos de enfriamiento o calentamiento

### **1.3.1- Aspectos técnicos de diseño**

Este sistema pasivo por conductos enterrados, tiene gran versatilidad la cual nos permite ser utilizado tanto en climas calientes como fríos sin tener variaciones en el principio que lo rige, en climas cálidos como el venezolano, se ha demostrado mediante estudios previos un comportamiento excepcional al lograr reducir la temperatura del aire exterior aproximadamente 10 °C en las horas donde hay mayor temperatura. Se aprecia la gran viabilidad de su aplicación ya que utiliza para su funcionamiento por lo menos 10 veces menos

energía que los equipos de aire acondicionado convencionales, no modifica las propiedades del aire y a su vez permite la renovación periódica de los caudales de aire dentro de las edificaciones.

Dado que el objetivo de los sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados o intercambiador térmico tierra-aire, es el intercambio de temperatura entre estos elementos, el conocimiento de las propiedades térmicas de los mismos es necesario para su correcto diseño e implementación. Asimismo también serán importantes las propiedades térmicas de los materiales utilizados en el sistema.

Entre los parámetros de diseño que deben ser controlados deben considerarse:

### **El tipo de material de los conductos**

En la actualidad desde un punto de vista térmico este parámetro no tiene una importancia realmente significativa debido a que el factor limitante alrededor de los conductos es la conductividad del suelo. En los conductos del prototipo se ha utilizado PVC, aunque existen diversos tipos de plásticos (polipropileno) y materiales como hormigón pretensado, cerámica, tubos metálicos galvanizados, etc. El material debe ser suficientemente resistente al aplastamiento cuando el tubo es enterrado. Los tubos corrugados presentan una mayor resistencia estructural pero también mayor impedimento al flujo y mayor posibilidad de encharcamiento del agua de condensación, si existiera la misma.

## **Dimensionado del sistema**

La influencia de las dimensiones del conducto, temperatura y velocidad de entrada del aire sobre la temperatura de salida del aire ha sido estudiada detalladamente por varios autores (Prof. Ernesto Lorenzo (2008) y Escuer, Joan, Geoconsultores Técnicos y Ambientales).

Entre las conclusiones más relevantes que llegaron se tienen:

- La temperatura de salida del aire depende mayormente de la temperatura de entrada.
  
- La variación diurna de la temperatura del suelo es aproximadamente sinusoidal, la amplitud decrece rápidamente en profundidad y el momento de la máxima y la mínima se desplaza con el tiempo existiendo un retraso en la medida que la onda térmica penetra el suelo.
  
- Las características del suelo son muy importantes: las propiedades térmicas del mismo tienen gran influencia en el comportamiento térmico del sistema.
  
- Los valores usuales para longitud de conductos se encuentran en el intervalo comprendido entre los 10 y los 100 m, dependiendo del diámetro de los conductos y el caudal que se quiera manejar.
  
- Para la velocidad del flujo del aire se consideran óptimos valores alrededor de 4 m/s para conductos de 20 cm. de diámetro, existiendo un compromiso entre la potencia necesaria para hacer circular el aire y el acondicionamiento resultante. Los diámetros pequeños son preferibles desde un punto de vista térmico pero para una misma velocidad de flujo presentan mayores pérdidas por fricción así

que lo más adecuado es el cálculo del balance entre la transferencia de calor y el soplado de aire en los conductos. Valores entre 20 y 60 cm. de diámetro son típicos pudiendo alcanzarse valores superiores al metro en grandes edificios (hoteles, centros comerciales, etc.).

- Es más eficiente un conjunto de conductos más cortos y menor diámetro, que menor cantidad de conductos de mayor longitud y mayor diámetro. El espaciado entre tubos debe ser aquel que permita que los conductos sean térmicamente independientes.

### **Tipo de suelo**

La conductividad térmica del suelo es el factor limitante más importante que se ha de tener en cuenta en el diseño de un intercambiador. Esta propiedad servirá para determinar el dimensionado. Así pues es de vital importancia clasificar el terreno según su conductividad térmica para lo que deben identificarse los tipos de suelo y rocas presentes en la zona así como las variaciones de las propiedades físicas relevantes desde un punto de vista térmico.

Los suelos húmedos son preferibles a los suelos secos debido a su mejor conductividad térmica aunque un excesivo grado de humedad no es conveniente. Situándonos en los extremos los terrenos turbosos y los suelos arenosos secos deben ser evitados. Algunos autores (Geoconsultores Técnicos Ambientales) sugieren rodear los conductos con arcilla compactada para asegurar un correcto contacto térmico entre los tubos y el terreno.

## Características térmicas del suelo en algunas zonas de Venezuela

Para la aplicación de los sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados es necesario, un informe geológico básico orientado a la aplicación de intercambiadores tierra aire debería incluir: un mapa geológico, acompañado de sus cortes, con especial detalle de las formaciones superficiales, así como características y disposición del substrato rocoso que permita conocer con cierto detalle los primeros 5 metros de profundidad, una estimación de la temperatura media anual en el suelo inmediato, la estimación de los valores de conductividad y difusividad térmica del terreno. <sup>2</sup>

Es necesario saber la conductividad de los suelos, las medias para rocas están entre 2 y 4 W/ m K, pero con valores extremos que pueden bajar hasta 0,5 W/ m K, en arcillas con elevada porosidad (ocupada por agua) o subir hasta 7,4 W/ m K en cuarzo-arenitas (areniscas formadas exclusivamente por cuarzo) y rocas evaporíticas (básicamente halita y yeso). Los valores más bajos corresponden siempre a rocas con elevada porosidad. <sup>2</sup>

Tabla 1.1 Conductividad térmica de los suelos:

Suelo Seco	k: 1 W/m K
Suelo Húmedo	k: 2 W/m K

Fuente: Mills, 1995, Transferencia de calor

En Venezuela las localidades superiores a los 2800 m registran bajas temperaturas durante el periodo diciembre-febrero. Sin embargo este es debido a las temperaturas medias del aire. El régimen de temperatura es conocido

---

<sup>2</sup>(Fuente: Escuer, Joan, Geoconsultores Técnicos y Ambientales)

como “isotérmico” debido a la reducida variación que tienen durante el año, presentando características especiales dentro de la capa superficial del suelo, entre 0 y 100 cm de profundidad.

La Temperatura del suelo corresponde en forma directa a los valores de la radiación solar recibida en cada lugar y es afectada por la altura y la topografía local. Puede ser bastante diferente de la del aire, logrando establecerse relaciones entre las temperaturas medias del aire obtenidas dentro de la casilla meteorológica, a dos metros de altura sobre el suelo, y las registradas a diferentes profundidades dentro del suelo.

### **Zonas climáticas de Venezuela para el diseño de edificaciones**

Los elementos del clima que condicionan el diseño de edificaciones son básicamente la temperatura del aire, la humedad, la radiación solar y el viento. Un primer examen del clima venezolano basado en atlas climatológicos (Álvarez, 1983; Hobaica, 1985) permite relacionar dichos elementos con la geografía, a fin de determinar variaciones de carácter general. Se concluye que:

- La temperatura del aire es el elemento que más claramente varía en Venezuela, en relación directa con la altitud. Los valores máximos superan los 35°C en las regiones bajas y no pasan de 15°C en las regiones montañosas altas. La amplitud diaria varía entre 5°C y 12°C, siendo menor en las zonas costeras y mayor en el resto del país. Por otro lado, por estar Venezuela cerca del ecuador, la amplitud térmica anual es comparativamente baja, menor que 5°C. Aunque tal amplitud faculte catalogar al clima como isoterma, su tamaño es suficiente para modificar la denominación del tipo de clima en una misma zona según la temporada.

- La humedad absoluta depende de la temperatura y, por consiguiente, de la altitud varía desde unos 7g/kg. en las regiones montañosas altas hasta más de 20g/kg. en las regiones bajas y húmedas. La humedad relativa en cambio es similar en todas partes, variando entre 60% y 100%, según la hora: menor en las tardes, cuando el aire se calienta, y mayor en las noches, cuando el aire se enfría.
- Si bien la intensidad de la radiación solar es un elemento esencial en el diseño de edificaciones, no presenta en Venezuela variaciones determinantes, pudiéndose considerar elevada en todas partes (20 MJ/m<sup>2</sup>día a 25 MJ/m<sup>2</sup>día en el plano horizontal).
- Finalmente se pueden distinguir tres zonas en las cuales la velocidad media del viento es, ya sea fuerte (más de 5 m/s en las zonas costeras), ya sea moderada (unos 3 m/s en las zonas continentales de latitudes intermedias), ya sea baja (menor que 2 m/s en el Sur del país). Por su parte, la dirección del viento a escala macro se corresponde con la de los vientos alisios (NE-E), pero en las zonas costeras el viento llega de día perpendicular a la costa (brisas marinas) y en las zonas montañosas y las ciudades las direcciones predominantes las imponen la topografía y el urbanismo.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> (Fuente: Rosales, Luis. (1987) Zonas climáticas para el diseño de edificaciones y diagramas bioclimáticos para Venezuela)

Cuadro 1.2 Zonas climáticas para el diseño de edificaciones en Venezuela

Zona	Altitud (m)	Tipo de clima	Algunas localidades importantes
1	0 a 400	Cálido húmedo a caliente húmedo	Acarigua, Altavilla de Orituco, Anaco, Barcelona, Barinas, Cabimas, Calabozo, Carúpano, Ciudad Bolívar, Coro, Cumaná, El Tigre, El Vigía, Guanare, Guaremas, La Asunción, Maiquetía, Maracaibo, Maturín, Píritu, Porlamar, Puerto Ayacucho, Puerto Cabello, Puerto La Cruz, Puerto Ordaz, Punto Fijo, San Carlos, San Felipe, San Fernando, Tucacas, Tucupita.
2	400 a 700	Cálido húmedo	Barquisimeto, Carora, El Tocuyo, Maracay, San Casimiro, San Juan de los Morros, Valencia, Valera
3	700 a 1.100	Cálido húmedo a moderado	Caracas, Caripe, Rubio, San Cristóbal, Santa Elena, Trujillo
4	1.100 a 1.700	Moderado	Boconó, La Grita, Los Teques, Mérida, San Antonio de los Altos
5	1.700 a 2.200	Moderado a frío	Bailadores, Colonia Tovar, Timotes, Galipán
6	2.200 en adelante	Frío	Apartaderos, Mucuchíes, Mucurubá, Santo Domingo

Fuente: Rosales, Luis. (1987) Zonas climáticas para el diseño de edificaciones y diagramas bioclimáticos para Venezuela

### **Profundidad**

Como valores típicos pueden considerarse profundidades comprendidas entre los 1,5 y los 3 m. Los tubos pueden ubicarse bajo el propio edificio o en el terreno colindante al mismo.

### **Mantenimiento**

Los intercambiadores deben estar equipados con filtros que impidan la entrada de partículas a la zona climatizada. El mantenimiento de los mismos



debe ser el adecuado. Los filtros deberán cambiarse periódicamente. El uso de filtros opacimétricos, que retienen el polvo. El control de las bocas interiores debe hacerse al mismo tiempo que las exteriores. Una limpieza quincenal es aconsejable. Para el mantenimiento a largo plazo debe considerarse que la vida útil de los ventiladores impulsores suele situarse entre los 15 y 20 años.

El riesgo de condensación en el interior de los intercambiadores aire-tierra es un riesgo a tener muy en cuenta. La existencia de humedades no tratadas en el sistema puede ocasionar el crecimiento de mohos y la generación de malos olores. El sistema debe ser accesible para permitir su lavado. Una frecuencia anual parece razonable. El clima efectivo del emplazamiento, la profundidad de las instalaciones y la velocidad de flujo tienen una incidencia clara en los riesgos de condensación. El uso de productos especializados, la utilización de agua con soluciones desinfectantes solo es posible si las pendientes permiten la evacuación para evitar el estancamiento. La limpieza deberá realizarse teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas reinantes para favorecer un buen secado.

Preferiblemente la instalación dispondrá de registros para facilitar el acceso a la instalación. Ello es más fácil en las instalaciones de gran diámetro pero también es posible en las instalaciones de menor diámetro.

### **Rendimiento económico**

El rendimiento económico de los intercambiadores tierra- aire es positivo para las aplicaciones de refrigeración ya que en climas templados si el sistema está correctamente diseñado permite prescindir de un sistema de aire

acondicionado convencional con un gran ahorro aunque para ello es imprescindible que la construcción a climatizar posea un aislamiento eficiente.

El rendimiento de los intercambiadores por si solos como sistema de calefacción es claramente insuficiente. El pequeño incremento de temperatura no justifica el coste de la instalación. No obstante si se tiene en cuenta el beneficio económico en clima caluroso puede considerarse que existe un beneficio añadido en el precalentamiento del aire de ventilación en invierno, si fuese el caso.

#### **1.4- Antecedentes de los sistemas pasivos de climatización en Venezuela**

La concepción, desarrollo y evaluación de sistemas pasivos de enfriamiento, para su aplicación en el diseño de edificaciones, ha sido por más de dos décadas una línea de investigación atendida por el Instituto de Desarrollo experimental de la Construcción (IDEC) facultad de Arquitectura de la Universidad Central de Venezuela (UCV), por el grupo de investigadores que la conforma. Las condiciones climáticas en el territorio Nacional son particularmente calientes y húmedas, a lo largo de todo el año, unido a una cultura derrochadora de energía, han justificado plenamente el trabajo en esta área del acondicionamiento natural del espacio habitable. En este sentido, los estudios sobre enfriamiento pasivo están enmarcados en el desarrollo de estrategias y técnicas que favorezcan el diseño arquitectónico bioclimático, basado este, en principios de conservación de energía y respeto por el contexto ambiental. Por otro lado, es bien conocida la crisis energético-ambiental que afecta nuestro planeta por la manera inconsciente y dispendiosa en que la energía ha sido utilizada en el último siglo.

Todo esto les lleva a concluir sobre la necesidad de promover el desarrollo del diseño arquitectónico sustentable basado en la aplicación de adecuadas estrategias bioclimáticas y sistemas pasivos de climatización (enfriamiento en nuestro caso), la cual se llega a acuerdos de cooperación con la Universidad de la Rochelle en Francia, a través de su laboratorio de Estudios de fenómenos de transferencia Aplicados a la Edificación (LEPTAB), gracias a este acuerdo se han logrado numerosos avances en el ámbito de los sistemas pasivos de climatización de edificaciones.

Uno de los aportes más significativos es una metodología simplificada cuya transferencia y aplicación en las zonas venezolanas permitió determinar el potencial de las diferentes técnicas pasivas para mejorar el confort y reducir el gasto energético de edificaciones. Este aporte empezó por la preselección de sistemas pasivos como Enfriamiento Radiativo, Evaporativo y por contacto con la tierra, de eficiencia comprobada en diferentes partes del mundo, a fin de evaluar su aplicación en edificaciones situadas en diferentes localidades urbanas, como las ciudades de Caracas, Maracaibo, Valencia, Mérida, Porlamar y Calabozo, por ser zonas climáticas representativas en nuestro país. Luego se agruparon todo los factores de cobertura de las cuatro técnicas pasivas de enfriamiento y se obtuvo como resultado:

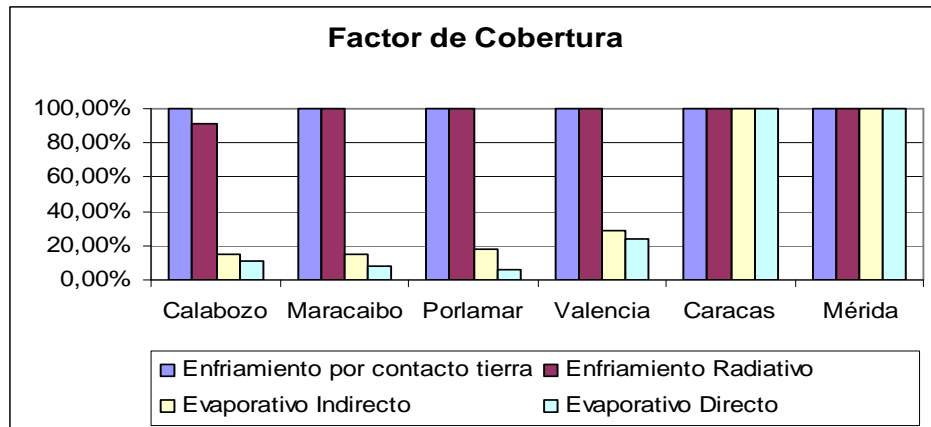


Fig. 1-4. Factores de cobertura de las cuatro técnicas evaluadas en las seis ciudades seleccionadas

Fuente: Prof. Lorenzo Ernesto (2008) Climatización pasiva por conductos enterrados IDEC-FAC-UCV

“Factor de Cobertura del Sistema Pasivo de enfriamiento, definido como la relación entre el índice del potencial útil y el índice de necesidad de enfriamiento durante un período dado y para una consigna en temperatura dada. Representa la parte de la energía suministrada por la técnica de enfriamiento natural a fin de satisfacer o completar las necesidades de climatización de la edificación. Expresa la interacción entre el sistema pasivo y edificación”<sup>4</sup>

Se pueden observar las amplias posibilidades de los conductos enterrados y los sistemas radiativos en Venezuela, a su vez se evidencian las restricciones de los otros sistemas pasivos. Basados en estos resultados se concluye que los sistemas pasivos de enfriamiento en Venezuela, especialmente los sistemas por conductos enterrados, poseen grandes posibilidades de aplicación, constituyendo alternativas para aumentar los niveles de confort y reducir su consumo energético.

<sup>4</sup> (Citado de M.E. Hobaica, R. Belardi, L. Rosales. (2001) Tecnología y Construcción Vol 17-1)

Como consecuencia de estos resultados, se han desarrollado trabajos de aplicación de esta tecnología por conductos enterrados para reforzar las líneas de investigación del IDEC sobre sistemas pasivos en edificaciones. Entre ellos tenemos el trabajo de investigación del Prof. Ernesto Lorenzo (2008), donde se realizó un prototipo del sistema por conductos enterrados que permitió obtener mediciones reales y evaluar su comportamiento en climas cálidos-húmedo, asimismo, basado en las mediciones se realizó un proyecto de aplicación en una edificación de uso industrial ubicada en Caracas. Demostrando la eficiencia del sistema de los conductos enterrados, tanto en el ahorro energético de la edificación como en el cumplimiento de las exigencias demandadas por los productos a almacenar.

Posteriormente se desarrolló un modelo físico matemático simplificado para el diseño de sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados, realizado por el Ing. Fontalvo, R. y el Ing. Silva, V. (2009), donde elaboraron una herramienta computacional, que facilitó su aplicación. Ésta herramienta permitió predecir el comportamiento térmico, así como el fluido dinámico y termodinámico, de un arreglo de conductos enterrados, pudiendo igualmente suministrar, en base a ciertos datos iniciales, la temperatura del aire a la salida de los conductos, la caída de presión según el recorrido y la condensación producida. La cual arrojó resultados satisfactorios y se demostró la eficiencia del sistema pasivo por conductos enterrados.

### **1.5- Conducción**

La *conducción*, que es el modo de transporte de calor en los sólidos, consiste en la transmisión de energía calórica entre moléculas en contacto directo, que tienen diferentes temperaturas. Las moléculas más calientes se

mueven más rápido, colisionando con las más frías, que se mueven más despacio. Al chocar, las moléculas rápidas ceden parte de su energía a las lentas. Este proceso continúa hasta que todas las moléculas alcanzan la misma energía cinética y en consecuencia la misma temperatura. Los sólidos son mejores conductores que los líquidos y éstos mejor que los gases. Los metales son muy buenos conductores del calor, mientras que el aire es un mal conductor.

Los mecanismos de calentamiento de las superficies son dos:

- Un mecanismo radiativo: la absorción de una fracción de la onda corta que incide directamente sobre ellas.
- Un mecanismo calórico: el flujo de calor de conducción (G).

Los mecanismos de enfriamiento de las superficies son tres:

- Un mecanismo radiativo: la emisión de onda larga.
- Dos mecanismos calóricos: los flujos de calor latente (LE) y calor sensible (H).

El flujo G no se considera un mecanismo de enfriamiento porque no involucra un intercambio de energía entre el cuerpo y el aire, sino una redistribución interna del calor.

La Tierra, sufre Calentamiento y enfriamiento rápidos e intensos, debido a que por un lado es un buen conductor, y por otro lado tiene un Calor Específico relativamente bajo, menor a  $1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  ( $0,18 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ ).

La ganancia neta de energía que sufren los cuerpos, que es la situación más común en las horas diurnas, debido al gigantesco aporte externo proveniente del sol, debe ser compensado por una pérdida neta en las horas

nocturnas, a fin de mantener el equilibrio energético del cuerpo. En la vida real, los procesos de ganancias y pérdidas (entradas y salidas de radiación de onda corta, onda larga y flujos calóricos) son simultáneos.

### **1.5.1- Conducción en régimen transitorio. Sólido semi-infinito.**

Tal sólido se extiende hasta el infinito en todas las direcciones excepto una, se caracteriza por una sola superficie identificable. Si se impone un cambio súbito de condiciones en esta superficie, ocurrirá una conducción unidimensional dentro del sólido. El sólido semi-infinito proporciona una idealización útil para muchos problemas prácticos, se aprovecha para determinar la transferencia de calor transitoria cerca de la superficie de la tierra.

### **1.6- Convección**

La convección, es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

## 1.7- La temperatura del aire como resultante de los procesos de superficie

La superficie gana calor más rápidamente de lo que puede disiparlo, hay un flujo de calor sensible hacia el aire, por lo que este se calienta. La turbulencia renueva constantemente el gradiente de temperatura, manteniendo el flujo con valores altos (Fig. 1-5)

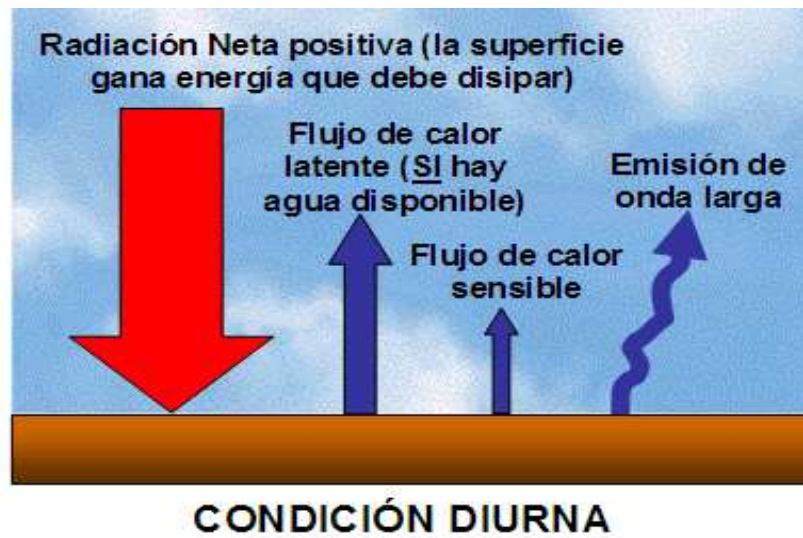


Fig. 1-5 Condición diurna

La superficie pierde calor rápidamente, no mucho después de la puesta del sol está más frío que el aire, por lo que se invierte el flujo de calor sensible, que pasa a calentar la superficie. Esto no es capaz de contrarrestar la pérdida por emisión, por lo que durante las horas nocturnas la constante pérdida de calor sensible de la atmósfera hacia el suelo enfría al aire. La mínima temperatura ocurre justo antes de la salida del sol (Fig.1-6)





Fig. 1-6 Condición nocturno

## **CAPITULO II**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Para el desarrollo de la presente investigación se optó por una metodología de investigación del tipo descriptiva y experimental, debido a que se toman en cuenta variables independientes, tales como diámetro, longitud, velocidad y temperatura del aire, y posteriormente se lograrán manipular, para observar su comportamiento fluido-dinámico y térmico, en el sistema de conductos enterrados.

Para esto se enfocó la investigación en tres partes.

La primera parte se hizo una revisión documental, y de esta manera avistar investigaciones previas realizadas. Luego de esto se procedió a la construcción del modelo computacional, e investigar la data correspondiente para poder ejecutar el proceso de simulación del programa. Y finalmente una fase de validación y análisis de resultados, para la posterior comparación con la data experimental recolectada, y de esta manera llegar a las recomendaciones y conclusiones.

En primer lugar la revisión documental se basó en el estudio a fondo de la investigación realizada por el Prof. Ernesto Lorenzo (2008) sobre “Climatización pasiva por conductos enterrados”, y la investigación de Fontalvo-Silva (2009) sobre “Modelo Físico-Matemático simplificado para diseño de sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados”. De esta manera se complementó con la mayor información de estos tipos de sistemas.

Se realizó un adiestramiento previo del simulador ANSYS® CFX™, bajo la instrucción de personal docente, así como de un curso especializado en

las Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería, para el aprendizaje y aplicación del software, en el modelo a estudiar. Adicionalmente se extrajo la data preliminar que se utiliza para los procesos computacionales.

La siguiente parte consistió en el desarrollo del modelo computacional, el cual abarca el proceso de diseño del sistema, donde viene contemplado las dimensiones del prototipo realizado por el Prof. Ernesto Lorenzo. Luego de esto el programa entra en una fase de estructurar en el lenguaje del programa computacional el modelo a estudiar.

El siguiente diagrama de bloque muestra la manera como está conformado el software como un conjunto de módulos:

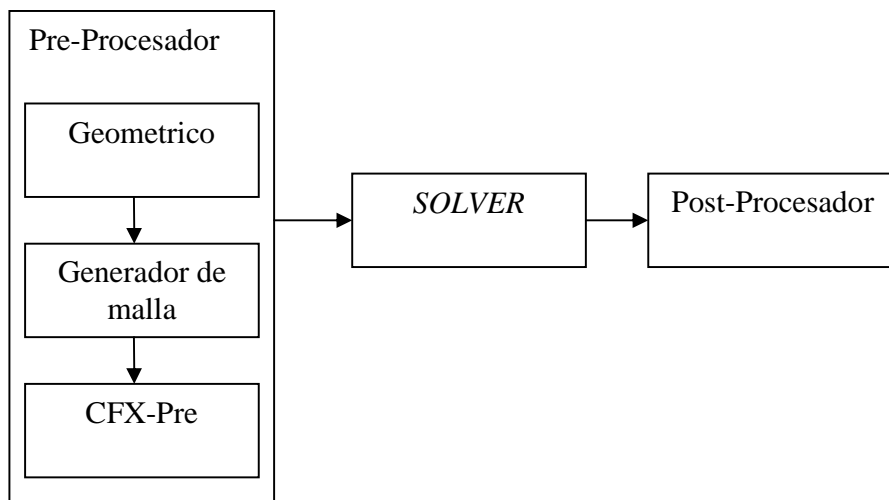


Fig. 2-1 Esquema ANSYS® CFX™

En el primer bloque grande se denomina Pre-procesador y tiene el propósito de generar el archivo de datos (geométricos, de malla y físicos-numéricos) que definen el problema a resolver.

Los tres bloques pequeños constituyen el Pre-procesador y los programas computacionales con los que ejecutan son:

En Geometría (Design Modeler™), es donde se crea o importa la geometría a utilizar, esta parte consistió en modelar la tierra el flujo y la tubería, la cual posteriormente se obvió por motivos de cómputo. A continuación se encuentra el Mallador (CFX-Mesh™) donde se selecciona y genera el tipo de malla adecuada, se optó por un tipo malla híbrida, (una parte desestructurada y otra estructurada) con el fin de observar de manera sobresaliente la capa límite térmica en el flujo. Geometría + Mallador (ICEM CFD™) utilizado para crear o importar geometría y para generar o importar la malla.

Una vez que se desarrolló la geometría y se realizó el mallado adecuado, era necesario establecer los parámetros a los cuales se somete el modelo, ésta es la fase del CFX-Pre™, donde se suministran los datos físicos y numéricos, tales como el tipo y las características del fluido, también donde se detallan todas las condiciones iniciales para la cual se lleve a cabo la simulación y las condiciones de borde, y en donde se modifican las variables de entradas y las condiciones en la cual se somete al sistema. Dentro de los requerimientos establecidos fijados al modelo se encuentra el régimen transitorio.

*SOLVER* es el siguiente bloque grande, se ejecuta con el programa computacional CFX-Solver™, esta fase tiene como propósito, encontrar la solución numérica, para los datos suministrados con CFX-Pre™ del sistema de ecuaciones de conservación de masa (global y por especie, si existe transferencia de masa), de momento y energía, si hay transferencia de calor. Y finalmente la fase del Post-procesador se ejecuta con el programa computacional CFX-Post™, y tiene como finalidad, visualizar en 2D o 3D y

animar (si existe régimen transitorio) para una mejor comprensión de los resultados obtenidos con CFX-Solver™.

La última parte de esta investigación se basó en el análisis de los resultados obtenidos en la parte previa. Con los resultados del CFX-Post™ se estudió cual fue el comportamiento de todo el sistema arrojando valores finales, y de esta manera interpretarlos para detallar la eficiencia del programa, y el error que existe entre los resultados arrojados por este y los datos finales recolectados del prototipo real.

## **2.1 LIMITACIONES**

El desarrollo del presente trabajo se encuentra sujeto a las siguientes consideraciones

- Necesidad de aprender un sistema operativo (Scientific Linux) y un software (ANSYS® CFX™)
- La geometría al ser de secciones variables, se convierte en una malla no estructurada lo que supone un mayor número de elementos, traduciéndose en un mayor tiempo de cómputo.
- Los tiempos de cómputo fueron prolongados, y es necesario un computador de alta capacidad para la ejecución de las simulaciones.
- Se tuvo que buscar datos extras que complementaran los datos experimentales iniciales.

### **CAPITULO III**

#### **MÉTODO DE VOLUMENES FINITOS**

El sistema de las ecuaciones que describen los procesos de momento, calor y de la transferencia de masa se conoce como las ecuaciones Navier-Stokes. Estas ecuaciones diferenciales parciales fueron derivadas y tienen muy pocas soluciones analíticas conocidas, por esto pueden ser discretizadas y solucionadas numéricamente. Las ecuaciones que describen otros procesos, tales como combustión, pueden ser resueltas en conjunto con las ecuaciones de Navier-Stokes. A menudo, un modelo aproximado se utiliza para derivar estas ecuaciones adicionales. Hay un número de diversos métodos de solución el más común, y en el cual se basa ANSYS® CFX™, se conoce como la técnica volumen finito.

El método de volumen finito es un método para representar y evaluar ecuaciones diferenciales parciales. Similar al método de diferencia finita, los valores son calculados en lugares discretos en una geometría mallada. "Volumen finito" se refiere a un volumen pequeño que rodea cada punto de nodo en una malla. La expresión "volumen finito" tiene realmente dos significados; uno es el método de intersección de los límites (enlazados en esta terminología) y la otra es el métodos de la interpolación no lineal. En el método del volumen finito, las integrales de volumen, en una ecuación diferencial parcial que contienen un término de divergencia, se convierten en integrales de superficie, usando el teorema de la divergencia. Estos términos entonces se evalúan como flujos en las superficies de cada volumen finito. Ya que el flujo que se incorpora a un volumen dado es idéntico al que sale del volumen adyacente, se dice que es un método conservativo. Otra ventaja del método de

volumen finito es que está formulada fácilmente para permitir mallas no estructuradas.

El método de volúmenes finitos recorre el sentido deductivo contrario obteniendo balances finitos a partir de los asociados a partículas infinitesimales. Para ello integra la ecuación diferencial original sobre un volumen finito, es decir, un trozo de intervalo (1D), superficie (2D) o volumen (3D) cuya forma concreta depende de la malla y del sistema coordenado que se esté empleando. Independientemente de la dimensionalidad del problema se sigue hablando de volúmenes finitos cuando uno se refiere a los trozos en los que se ha subdividido el dominio. Lo que se acaba teniendo es un balance [entrada + aportación ( $\pm$ )  $\rightarrow$  salida] en cada una de las zonas discretas en las que se ha subdividido el dominio global. De aquí que el proceso comience con la decisión sobre el troceado del dominio, es decir, número, tamaño, y ratio de expansión/contracción de los volúmenes de discretización. Después de la integración el procedimiento postula variaciones internodales de la solución que permiten sustituir las derivadas por relaciones algebraicas entre valores nodales

De una manera general en esta técnica, la región de interés se divide en las pequeñas subregiones, llamado volúmenes de control. Las ecuaciones son discretizadas y solucionadas iterativamente para cada volumen de control. Como resultado se llega a una aproximación del valor de cada una de las variables en los puntos específicos a través del dominio. De esta manera, uno deriva un cuadro completo del comportamiento del flujo.

Para comenzar el primer paso a seguir es dividir el dominio físico del fenómeno, en volúmenes de control, los cuales se integran respecto al tiempo y el espacio. La integración en cada volumen de control produce un sistema de ecuaciones algebraicas que se resuelve mediante métodos iterativos. La forma

en que se concibe el Método de Volúmenes Finitos garantiza siempre la conservación de las propiedades relevantes del flujo en todo el dominio, y hace al método fácil de comprender y programar (Versteeg y Malalasekera, 1995).

### 3.1- Ecuaciones de conservación

La conservación de las propiedades relevantes de un flujo dentro de un volumen de control puede ser expresada como un balance entre varios procesos que tienden a incrementarlas o disminuirlas. Las ecuaciones de conservación se pueden escribir de forma diferencial como:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi u) = \nabla \cdot (\Gamma^{\phi} \nabla(\phi)) + S^{\phi} \quad (3.1)$$

donde los términos generales son sustituidos por los términos dados en la Tabla 3-1, dependiendo de la ecuación de conservación de interés. El primer término del lado izquierdo de la ec. 3.1 representa la variación temporal de la propiedad  $\phi$  dentro del volumen de control. El segundo término representa el balance convectivo de la propiedad  $\phi$ . El primer término del lado derecho representa el balance difusivo, mientras que el último término representa las fuentes que incrementan o los sumideros que disminuyen a la propiedad  $\phi$ .

Maliska (2004) define la forma conservativa, o forma divergente, de una ecuación, como aquella en la cual la ecuación diferencial, al ser integrada una vez, resulta en los flujos de la propiedad a través de la superficie de control, lo que es equivalente al balance de la propiedad dentro del volumen de control. Es por ello que la ec. 3.1 es comúnmente utilizada en la implementación del MVF.



Maliska (2004), presenta una simplificación de forma diferencial de las ecuaciones de continuidad, *momentum* y energía, y que puede escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S^{\phi} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Donde los términos generales son sustituidos por los términos dados en la tabla 3-1 dependiendo de la ecuación de conservación de interés.

Tabla 3.1 Términos a sustituir en la forma general de la ecuación de conservación

Ecuación de Conservación	$\phi$	$\Gamma^{\phi}$	$S^{\phi}$
Masa	1	0	0
Cantidad de movimiento en x	u	$\mu$	$B_x + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu\nabla\cdot\vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial x}\right) - \rho u$
Cantidad de movimiento en y	v	$\mu$	$B_y + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu\nabla\cdot\vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial y}\right) - \rho v$
Cantidad de movimiento en z	w	$\mu$	$B_z + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu\nabla\cdot\vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial z}\right) - \rho w$
Energía	T	$\frac{k}{C_p}$	$\frac{1}{C_p}\frac{Dp}{Dt} + \frac{\mu}{C_p}\Phi$

### 3.2- Malla de cómputo

La aplicación del FVM requiere la discretización espacial del dominio de solución en volúmenes de control finitos, usando una malla de cómputo. Sobre cada superficie de control las ecuaciones de conservación se integran respecto al espacio. Una variante del FVM es el método de volúmenes finitos basados en elementos (EbFVM), en el que la malla esta conformada por elementos que pueden tener forma de triángulos o cuadriláteros, en las mallas de superficies, y forma de tetraedros, pirámides (de base cuadrilátera), prismas (de base triangular) o hexaedros en las mallas de volumen. Por lo general, el centroide de cada volumen de control coinciden con los vértices de los elementos, ubicación de los puntos nodales o nodos, donde se computa el valor de las variables (Maliska, 2004) (Fig. 3- 1).

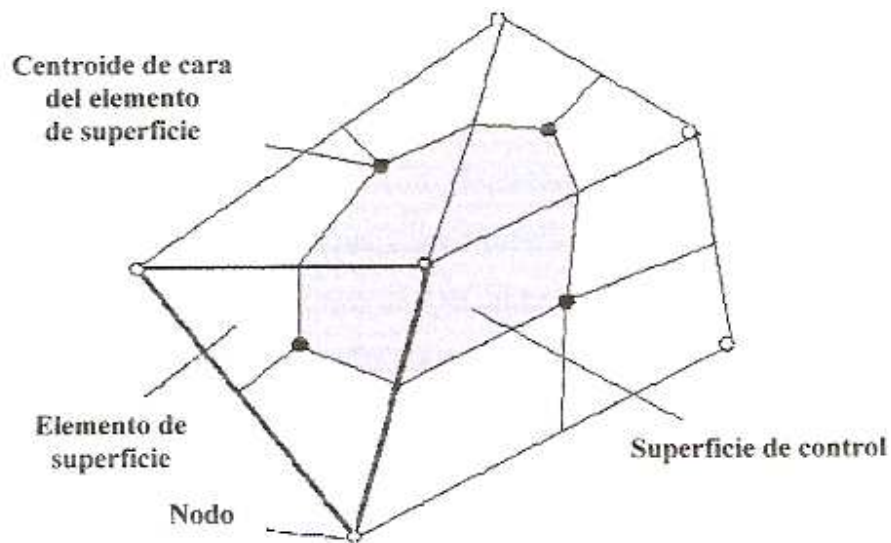


Fig. 3-1 Elementos y volumen de control de una malla de cómputo (ANSYS® CFX-Solver™ Theory 2005)

### 3.3- Mallas estructuradas vs. mallas desestructuradas

Una malla es estructurada cuando cada volumen interno tiene siempre el mismo número de vecinos (Maliska, 2004). La estructuración de la malla no solo permite un fácil ordenamiento de los elementos a la hora de la generación, sino también determina la forma de la matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones algebraicas, la cual tiene implicación en el alcance de la convergencia del método y en la optimización del tiempo de compute.

La estructuración de la malla puede hacerse de manera que las aristas de sus elementos se intercepten en ángulo recto (malla ortogonal), o en ángulos diferentes a  $90^\circ$ . La primera opción permite utilizar funciones de interpolación sencillas para la integración de las ecuaciones de conservación (Maliska, 2004) e incluso integrarlas de forma analítica (Versteeg y Malalasekera, 1995), dada la sencillez geométrica de los volúmenes de control, pero su uso está limitado a geometrías simples. La segunda opción requiere utilizar esquemas de interpolación más complejos para la integración de las ecuaciones de conservación pero su uso, aunque aun limitado, puede ser ampliado a geometrías menos simples (Fig. 3- 2a y 3- 2b).

En el pasado, las mallas estructuradas se requerían porque debían ser escalonadas, una para el cálculo de cada componente de cantidades vectoriales (velocidades) y otra para el cálculo de cantidades escalares (presión), para evitar inconsistencias en el campo de presión (Versteeg y Malalasekera, 1995). Sin embargo, el desarrollo de nuevos esquemas de interpolación y algoritmos de solución de las ecuaciones, han permitido el uso de una única malla para el cálculo de todas las propiedades.

Una malla desestructurada no presenta una secuencia l3gica de sus elementos, y es f3cil de reconocer por la dificultad de seguir una ruta ordenada de los mismos (Maliska, 2004). Estas mallas presentan gran versatilidad a la hora de adaptarse y discretizar geometrías irregulares, pero tienen la desventaja de requerir esquemas de interpolaci3n m3s complejos que los utilizados para mallas estructuradas, aumentando el tiempo de c3mputo (Fig. 3- 2c).

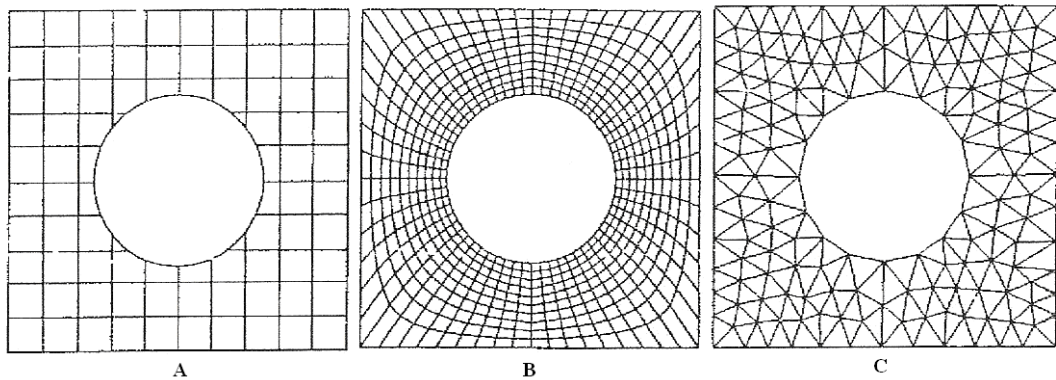


Fig. 3-2 Mallas de c3mputo. a) Estructurada Ortogonal b) Estructurada No ortogonal c) Malla no estructurada (Maliska, 2004)

Adem3s tenemos las mallas h3bridas que es la uni3n de mallas estructuras y desestructuradas (Fig. 3-3)

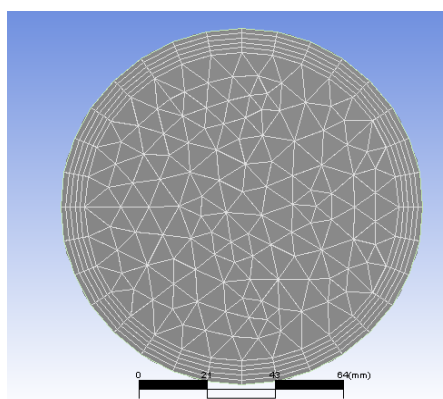


Fig. 3-3 Malla de c3mputo: H3brida

Como regla general, es recomendable utilizar mallas estructuradas siempre que la geometría de interés lo permita, y mientras más cercanas sean a las mallas ortogonales, la convergencia del método y el tiempo de cómputo serán óptimos.

### **3.4- Discretización e integración de las ecuaciones**

Tradicionalmente, el MVF se ha implementado con el siguiente algoritmo numérico: integrar formalmente las ecuaciones de conservación, en todos los volúmenes de control en los cuales se ha discretizado el dominio; sustituir, en las ecuaciones integradas, funciones de interpolación que relacionan los valores de las propiedades en los nodos con los valores en las superficies de control, y luego resolver el sistema de ecuaciones algebraicas resultante del proceso de discretización anterior (Versteeg y Malalasekera, 1995; Rincon, 1998).

Sin embargo, el planteamiento tradicional obliga a utilizar mallas estructuradas a fin de facilitar el escalonamiento de ellas. Como ya se ha mencionado, el uso de mallas estructuradas presenta limitaciones para la discretización de geometrías complejas, por lo que se ha desarrollado una variante del MVP que aprovecha la versatilidad de las mallas desestructuradas, denominado por Maliska (2004) como método de volúmenes finitos basados en elementos (Element-based Finite Volume Method — EbFVM).

### **3.5- Método de volúmenes finitos basados en elementos**

En este método, los volúmenes de control se establecen alrededor de cada nodo, uniendo el centroide del elemento con el punto medio de los bordes

del elemento (método de la mediatriz), o juntando las líneas perpendiculares a cada segmento de línea que une los nodos (diagramas de Voronoi). Las ecuaciones de conservación, en forma integral, son resueltas numéricamente en estos volúmenes de control, mediante el empleo de funciones de forma. Este procedimiento es análogo al empleado en el método de elementos finitos, de allí el nombre de esta variante del MVF (Rincon, 1998).

Considere la ecuación de conservación de la variable general  $\phi$  (ec. 3.2), expresada en coordenadas cartesianas como:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S^{\phi} \quad (3.3)$$

donde  $j = x, y, z$ , representa la dirección en la cual se toma la derivada de las funciones.

La ec. 3.3 se integra sobre un volumen de control, y el teorema de Gauss de la divergencia se aplica para convertir algunas integrales de volumen en integrales de superficie. Si el volumen de control no cambia en el tiempo, la derivada temporal puede escribirse fuera del símbolo integral, y la ecuación se expresa como:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho u_j \phi dn_j = \int_S \left( \Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S^{\phi} dV \quad (3.4)$$

En la ec. 3.4 las integrales de superficie representan los flujos de  $\phi$  a través del volumen de control, mientras que las integrales de volumen

representan términos fuentes y sumideros. Para resolver numéricamente esta ecuación, es necesario aproximarla mediante funciones discretas.

La Fig. 3-4 muestra los elementos necesarios para formar un volumen de control centrado en I. La base de la metodología de discretización consiste en trabajar con los sub-volúmenes de control en lugar de hacerlo directamente con el volumen de control. Este tratamiento individual de cada elemento, permite que la malla sea desestructurada, bastando con conocer la conectividad de los elementos, practica seguida en el método de elementos finitos (Maliska, 2004).

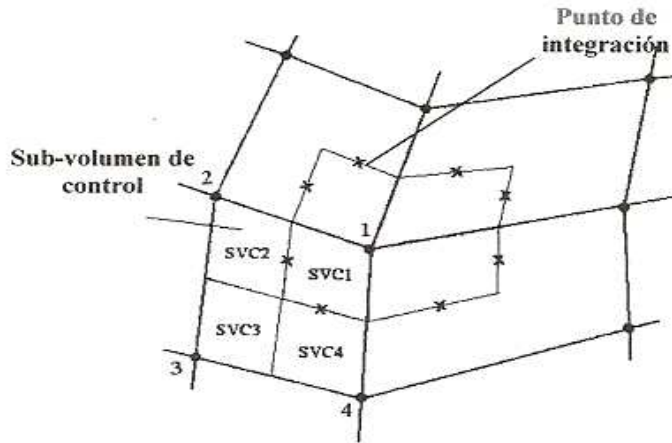


Fig. 3-4 Sub-volúmenes de control de una malla de cálculo (Maliska, 2004)

La forma discretizada de la ec. 3.4 es escrito como:

$$V(\rho^0 \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial \rho}{\partial t}) + \sum_{pi} m_{pi} \phi_{pi} = \sum_{pi} (\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j)_{pi} + S^\phi V \quad (3.5)$$

donde V es el volumen de control, el subíndice pi denota punto de integración, el superíndice 0 denota el valor de la propiedad en el instante de tiempo anterior

y  $\Delta n_j$  es la componente en la dirección  $j$ , del vector normal a la superficie del volumen de control, apuntando hacia afuera del mismo. El flujo de masa discreto a través de una superficie del volumen de control, denotado por  $m_{pi}$  viene dado por:

$$\dot{m}_{pi} = (\rho u_j \Delta n_j)_{pi} \quad (3.6)$$

Para discretizar totalmente la ecuación de conservación, es necesario aproximar las derivadas respecto al tiempo y los gradientes. El término temporal puede ser aproximado utilizando una formulación explícita o implícita (Versteeg y Malalasekera, 1995).

Para aproximar los gradientes, se utilizan las funciones de forma, que no son, más que una transformación de coordenadas globales a coordenadas locales al elemento (Fig. 3.5), lo que permite dar un tratamiento independiente a cada elemento, sin importar su forma geométrica. La transformación de coordenadas esta dada por:

$$x_j(\xi, \eta, \gamma) = \sum_{i=1}^{N \text{ nodos}} N_i(\xi, \eta, \gamma) x_{ji} \quad (3.7)$$

Así el gradiente de  $\phi$  en la dirección  $j$  puede escribirse como:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right|_{pi} = \sum_n \left. \frac{\partial N_n}{\partial x_j} \right|_{pi} \phi_n \quad (3.8)$$



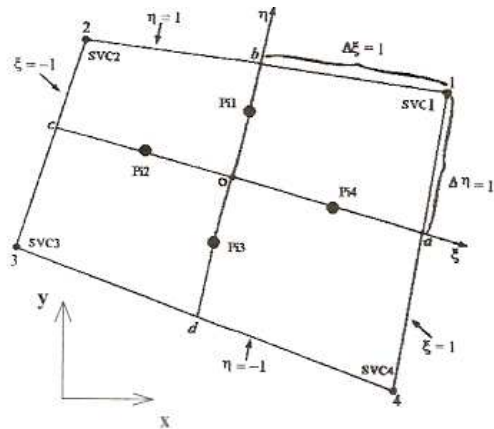


Fig. 3-5 Coordenadas locales a un elemento (Maliska, 2004)

Las funciones de forma para cada tipo de elemento pueden encontrarse en ANSYS® CFX-Solver™ Theory (2005). Este procedimiento es repetido para todo los volúmenes de control en el dominio, resultando en un sistema de ecuaciones algebraicas que es resuelta empleando un método iterativo.

## **CAPITULO IV**

### **SIMULACIONES COMPUTACIONALES**

ANSYS® CFX™ es un software de CFD (siglas en ingles de Dinámica de fluido computacional). Éste utilizaba la técnica numérica conocida como Método de volúmenes finitos (FVM), que requiere que la malla a utilizar sea estructurada, para permitir el escalonamiento, mientras que las versiones actuales utilizan una variante denominada Método de volúmenes finitos basados en Elementos finitos (EbFVM), también conocida como Método de volúmenes finitos basados en Volúmenes de Control (CVFEM), y en la cual ya la malla puede ser desestructurada. Dicho software utiliza estos métodos numéricos para resolver el sistema de ecuaciones de conservación, constituido por una modificación de la ecuación de continuidad global (Ec. de masa-presión), tantas ecuaciones de continuidad por especie como sustancias estén presentes, tres ecuaciones (escalares) de momento, y la ecuación de energía (si aplica para el caso de estudio). Además incorpora funciones lineales de interpolación, para los términos difusivos de todas las ecuaciones discretizadas y el de presión de las ecuaciones de momento, y varios esquemas de diferenciación para la parte del modelo transitorio. También tiene implementado un algoritmo propio de solución para acoplar las ecuaciones, y la técnica numérica conocida como “multigrid” para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas linealizadas.

#### **4.1- Proceso de diseño del modelo**

Para el diseño del modelo se utilizó la geometría planteada para construir el prototipo del Prof. Ernesto Lorenzo, la cual consta de tres sistemas de conductos enterrados.

Las dimensiones son:

- 102 mm de diámetro, y 15 m de longitud.
- 152 mm de diámetro, y 15 m de longitud.
- 102 mm de diámetro, y 30 m de longitud.

Para dibujar las tres configuraciones, se inicio con el diseño en el WorkBench™ del ANSYS®, en el Modelador del Diseño, allí se define un plano de trabajo y a partir de este se hacen los trazos con las dimensiones deseadas (Fig. 4-1 y 4-2), se hicieron circunferencias de 102 y 152 mm correspondientes a los diámetros de la tubería de los prototipos, mientras que las dimensiones de los codos fueron obtenidas de tablas (tabla 4-1 y Fig. 4-3), que se compararon con las proporcionadas por el arquitecto que fueron utilizadas en la construcción del prototipo, las longitudes son 15 y 30 m dependiendo de la configuración, y la profundidad del conducto horizontal siempre es de 2 m.

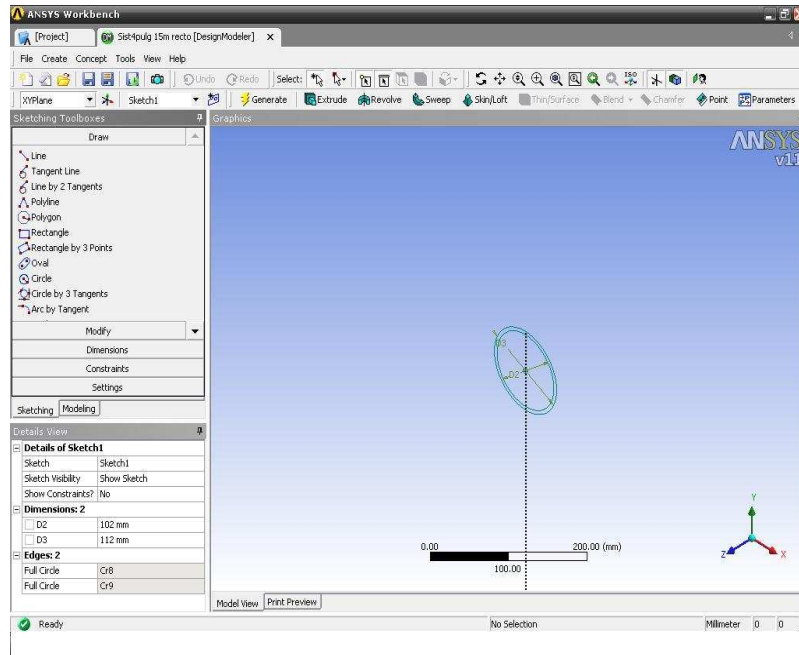


Fig. 4-1 Trazos de diámetro de tubería. ANSYS® WorkBench™

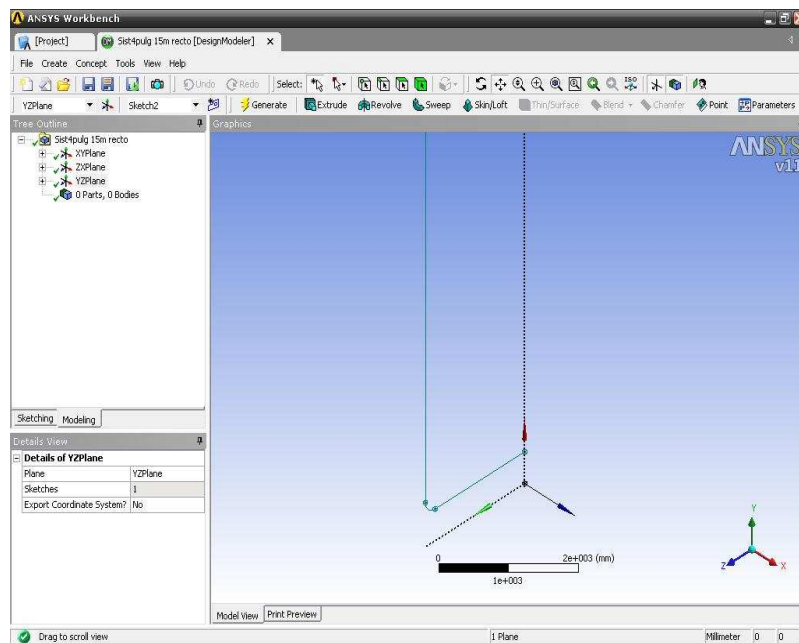


Fig. 4-2 Trazos de longitud de tubería. ANSYS® WorkBench™

Tabla 4.1 Tabla codos tuberías

Fuente: Ingersoll- Rand, 1981, Cameron hydraulic data.

DIMENSIONS ARE IN INCHES

NOMINAL PIPE SIZE	90 - DEG ELBOWS		45 - DEG ELBOWS	
	D	E	F	G
1/2	2.25	1.94	1.38	1.06
3/4	2.25	1.94	1.38	1.06
1	2.38	2.00	1.50	1.12
1-1/4	2.88	2.44	1.78	1.34
1-1/2	3.50	2.94	2.19	1.62
2	4.28	3.72	2.53	1.97
2-1/2	5.38	4.62	3.19	2.44
3	6.17	5.41	3.52	2.76
3-1/2	7.00	6.25	3.92	3.17
4	7.78	6.97	4.27	3.45
5	9.53	8.59	5.14	4.20
6	11.17	10.17	5.91	4.91
8	14.62	13.38	7.59	6.34
10	18.00	16.56	9.22	7.78
12	21.25	19.69	10.70	9.14

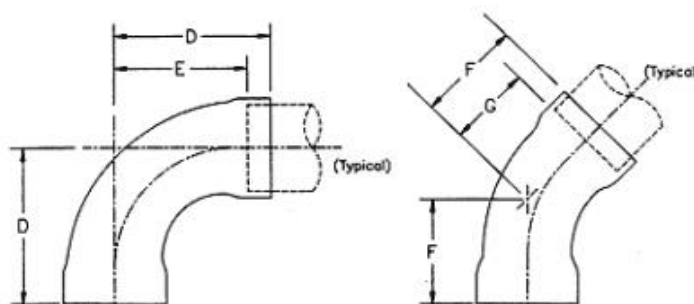


Fig. 4-3 Dibujo de codos relacionado con tabla codos tuberías (Tabla 4-1)

Fuente: Ingersoll- Rand, 1981, Cameron hydraulic data.

Luego estos trazos se convierten en superficies (Fig. 4-4) para luego complementar el modelo con el volumen “tierra”, para esto se trazó un paralelepípedo de 2,5 m de ancho, 2,5 m de profundidad, 16 y 31 m de largo para el caso correspondiente (Fig. 4-5).

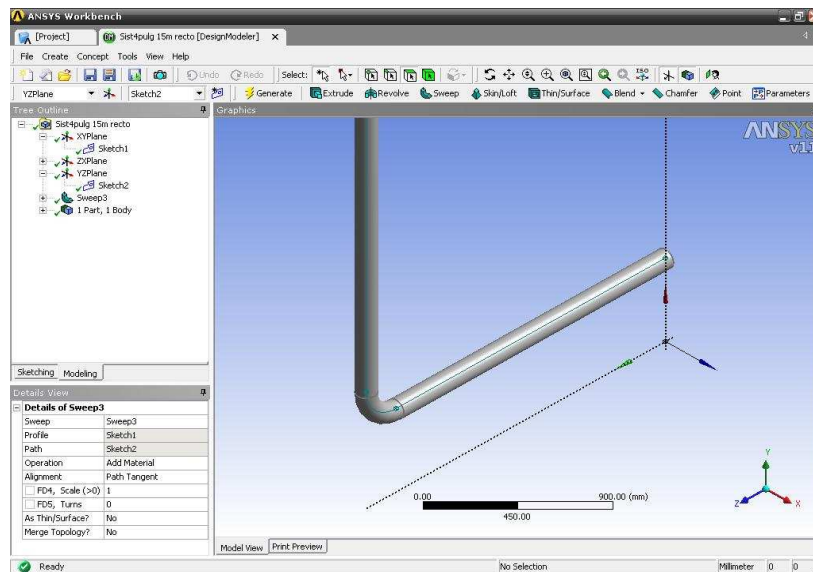


Fig. 4-4 Superficie de tubería. ANSYS® WorkBench™

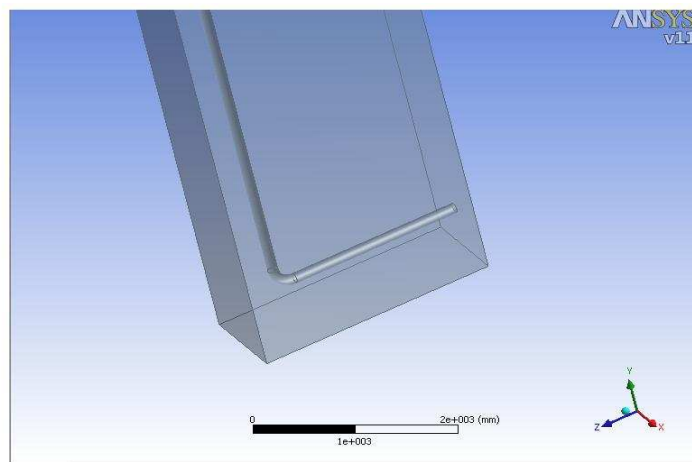


Fig. 4-5 Modelo de tierra-flujo armado. ANSYS® WorkBench™

También el programa tiene la posibilidad de importar archivos de geometría de otros softwares de dibujo compatible con el mismo.

## 4.2- Proceso del mallado del modelo

El paso siguiente después de tener el modelo dibujado, es el proceso de mallado (Fig. 4-6).

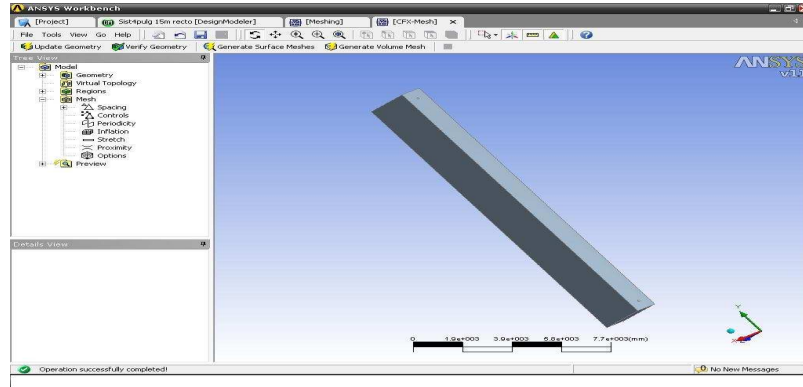


Fig. 4-6 Ambiente CFX-Mesh™. ANSYS® WorkBench™

Esta fase corresponde a dividir en volúmenes finitos cada región del sistema a evaluar, en este caso está compuesto por dos dominios evaluados, la tierra, y el fluido. Existe un ramal en el cual se define como es la malla a utilizar, esta va a depender del tipo de geometría a estudiar. (Fig. 4-7)

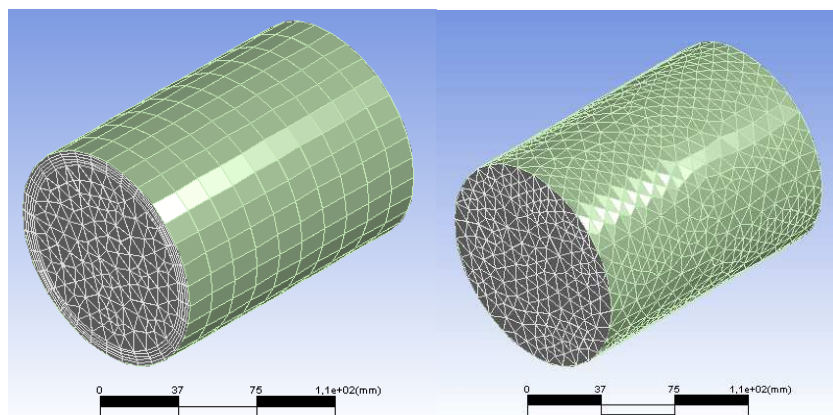


Fig. 4-7 Malla híbrida y malla desestructurada. ANSYS® WorkBench™

En esta sección se precisa la geometría seleccionada, para luego puntualizar los rangos de tamaño de los elementos que intervienen (Fig. 4-8), así como el tipo de mallado. Al realizar el proceso se pasa por una verificación de la geometría para luego generar la malla de la superficie, y finalmente la malla de volumen. Cabe destacar que el tamaño de los elementos es determinante en el tiempo de ejecución del programa así como de la exactitud de los resultados en la simulación.

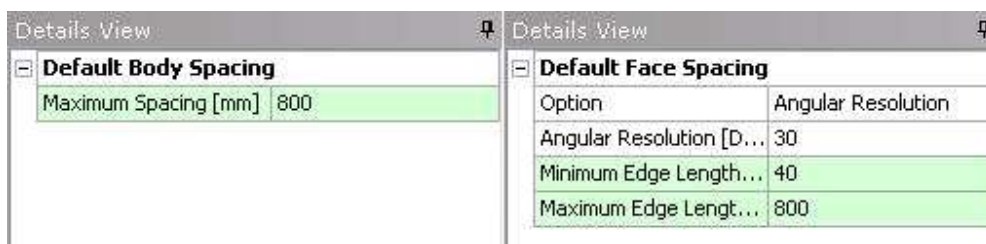


Fig. 4-8 Ventanas de modificación de propiedades de elementos. ANSYS® WorkBench™

Al momento de definir el dominio de la “tubería” y mallarlo, se observó que el número de elementos creados era muy alto en comparación con los dominios adyacentes a esta, “tierra” y “flujo”. Se deben tener nodos dentro de la “tubería”, y al ser esta tan pequeña en comparación con los demás dominios, se crean elementos muy pequeños en todo el modelo, lo que ocasiona problemas al momento de ejecutar la simulación, por lo que se tuvo que obviar el dominio “tubería”.

Para el modelo a estudiar se utilizó una malla híbrida (Fig. 4-9), debido a que la geometría utilizada no es uniforme. Para el dominio “flujo” se utilizó una malla inflada de tipo estructurada en su perímetro, esto es debido a la necesidad de estudiar el efecto de capa límite térmica (Fig. 4-10).



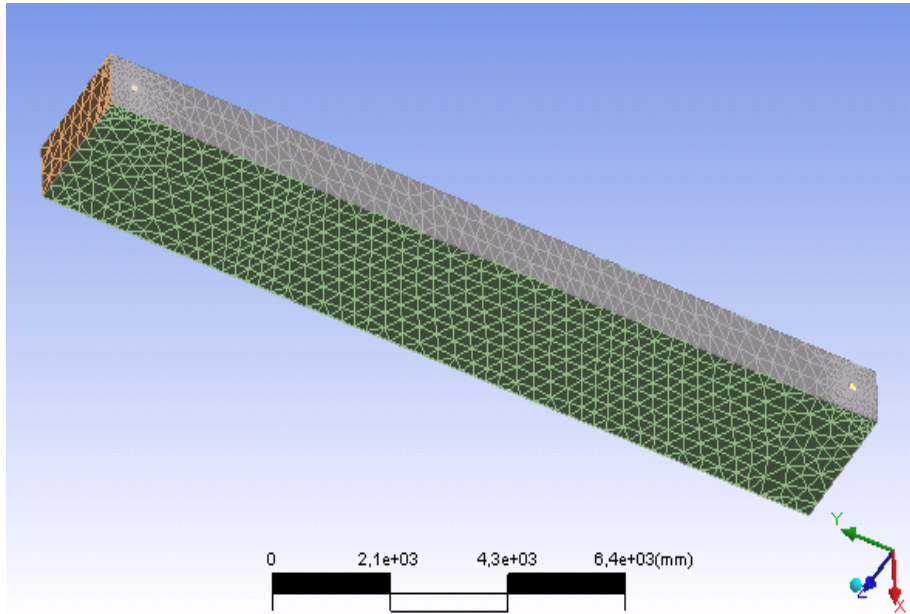


Fig. 4-9 Mallado final del modelo. ANSYS® WorkBench™

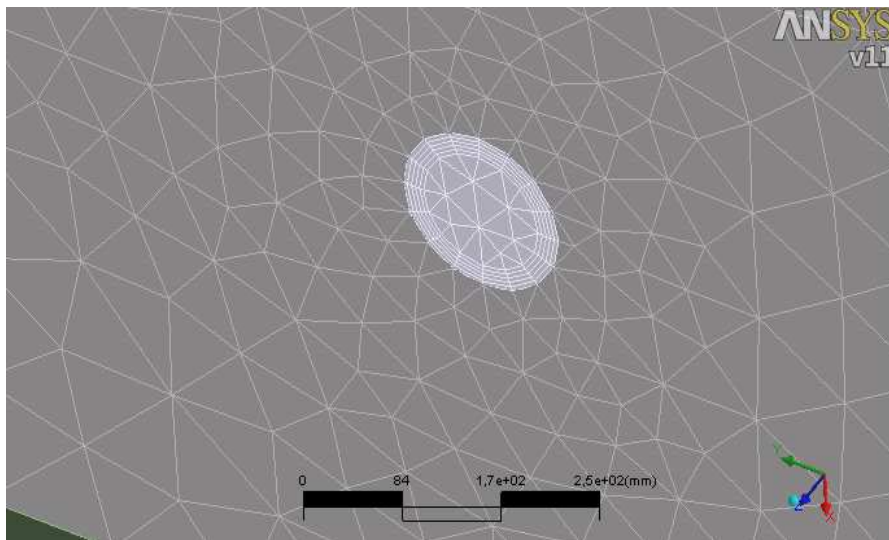


Fig. 4-10 Detalle del mallado en "flujo". ANSYS® WorkBench™

### **4.3- Procesos de simulación CFD con malla**

Luego de la creación del archivo de malla, se procede a realizar las diferentes fases previas a la simulación. Allí vienen contempladas los tres procesos fundamentales para la simulación, se encuentra la fase del CFX-Pre™, CFX-Solver™ y CFX-Post™.

#### **4.3.1- CFX-Pre™**

Esta es la parte más importante del proceso, donde se definen todas las condiciones en las cuales estará sometido el modelo a evaluar. Aquí se carga el archivo donde se definió la geometría-malla, para luego introducir las características principales de la simulación, como por ejemplo, el fluido de trabajo con sus respectivas propiedades, estado del sistema, el régimen del fluido, modelo fluidodinámico, para luego definir las condiciones de borde previamente establecidas, y concluir con el desarrollo del archivo final que se introdujo en el solucionador. Este procedimiento se realizó para las tres configuraciones de conductos enterrados.

Para el proceso en CFX-Pre™, se tiene inicialmente un ramal de configuración de la malla y configuración de la simulación como se observa en la Fig. 4-11.

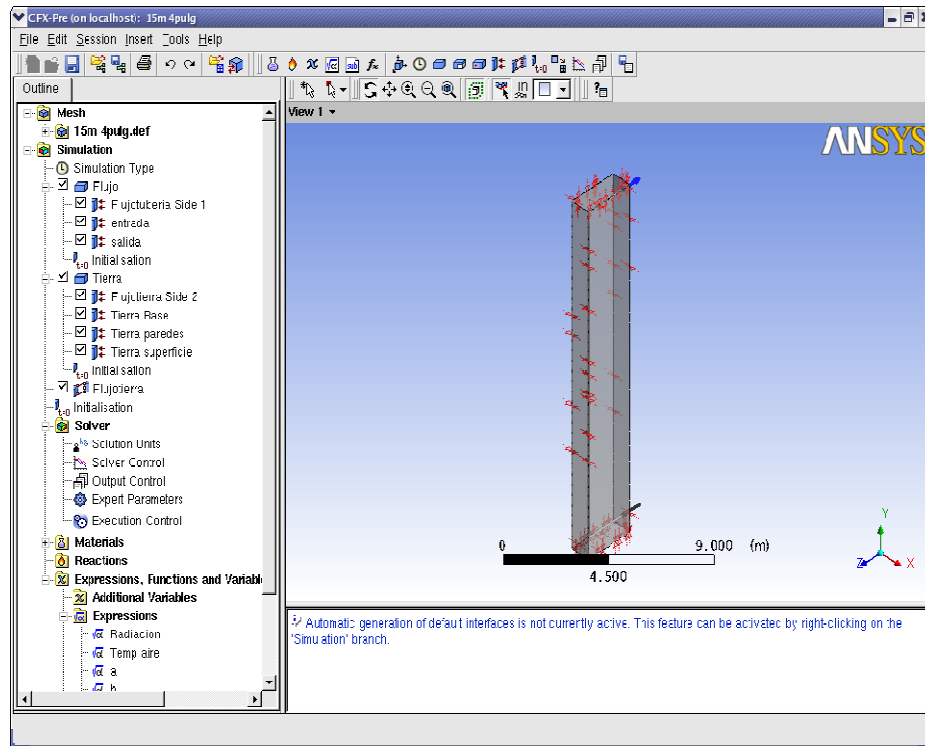


Fig. 4-11 Ambiente de trabajo. ANSYS® CFX™

En el ramal, en la carpeta de la malla, se encuentran todas las estructuras o geometrías malladas presentes, y en cada una están definidas sus superficies. En este mismo ramal, existe una carpeta donde se define la simulación, donde se definen todos los dominios y sub-dominios presentes, comenzando con el tipo de simulación, ya sea permanente o transitoria. Inicialmente se pretendió desarrollar la simulación en régimen permanente, pero para observar mejor el comportamiento del sistema en el tiempo, se tomó de tipo transitoria.

Se desarrolla la simulación, en régimen transitorio, donde se estudio un día, que fue tomado de manera aleatoria dentro de los meses, del estudio experimental realizado por el Prof. Ernesto Lorenzo, tomando en cuenta la variación de temperatura del aire de entrada al conducto, velocidad del viento y

la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra, fue seleccionado el 11/03/07 a partir de 8 a.m. hasta el 12/03/07 a las 8 a.m.

Debido al estudio en régimen transitorio, el módulo de procesamiento (solver) del software empleado, requiere establecer valores iniciales para la velocidad del fluido (aire), para la distribución de fracción volumétrica y presión en el dominio de solución. Para obtener estos valores iniciales se realizaron simulaciones adicionales donde se evaluó sólo la geometría del flujo (aire), en régimen permanente y adiabático, pero a la misma velocidad de flujo y una temperatura promedio de aire ambiente del día de estudio, a la entrada del conducto. Luego de esto se incluye el archivo de resultados como condiciones iniciales al momento de iniciar la simulación en régimen transitorio, la cual contempla el modelo a estudiar.

Las simulaciones iniciaron en un tiempo  $t: 28800$  s (8 a.m.) avanzaron con el tiempo con un paso constante  $400$  s y se detuvo al terminar el día para un  $t: 115200$  s (8 a.m.), este tiempo corresponde desde que inicia la radiación solar hasta que se oculta el sol.

El número de Courant es de importancia fundamental para los flujos transitorios. Para un mallado unidimensional, se define cerca:  $Corant = u \cdot AT / Ax$  donde  $u$  es la velocidad del fluido,  $AT$  es el paso de tiempo y el  $Ax$  es el tamaño de malla. El número de Courant calculado en ANSYS® CFX™ es una generalización multidimensional de esta expresión donde la escala de la velocidad y de la longitud se basa en el flujo másico en el volumen de control y la dimensión del volumen de control. Para los métodos explícitos del CFD, el paso de tiempo debe ser elegido tal que el número de Courant sea suficientemente pequeño. Los detalles dependen del esquema particular, pero está generalmente en el orden de la unidad. Como código implícito, ANSYS®

CFX™ no requiere el número de Courant sea pequeño para la estabilidad. Sin embargo, para algunos cálculos transitorios, uno pudiera necesitar que el número de Courant sea pequeño para resolver con precisión los detalles transitorios.

ANSYS® CFX™ utiliza el número de Courant de las siguientes maneras:

1. El paso de tiempo se puede elegir basándose en una condición del número de Courant (alcanzando el RMS o que el número de Courant sea 5).
2. Para las simulaciones transitorias, el máximo y los números de Courant del RMS se escriben en el archivo de salida en cada paso de tiempo.
3. El campo de número de Courant se escribe en el archivo de los resultados.

Dentro de los parámetros manejados ya mencionados, tenemos el tiempo total de la simulación, los pasos de tiempo que son los intervalos de iteración de la simulación, y el valor inicial es el instante de tiempo donde empieza la simulación, que se muestra en la Fig. 4-12.

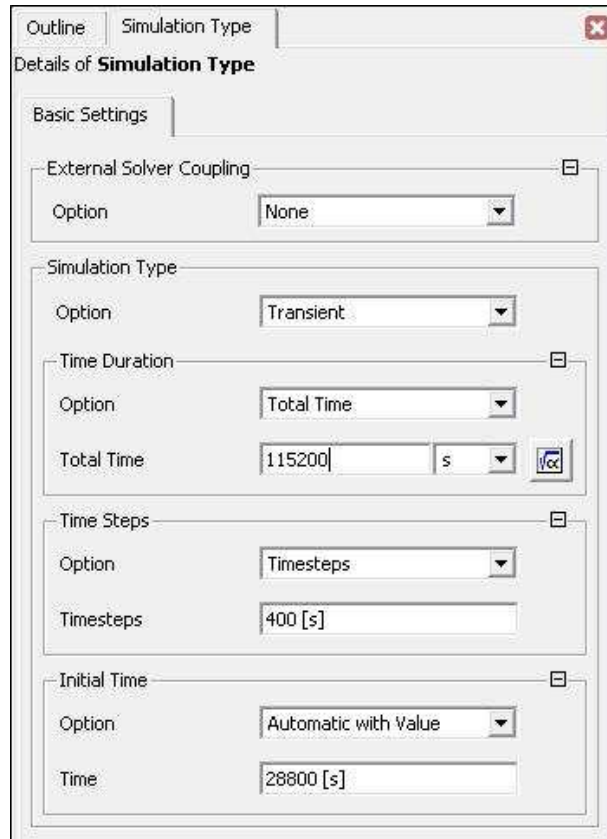


Fig. 4-12 Ventana tipo de simulación. ANSYS® CFX™

Posteriormente se definen los dominios del modelo, la cual está conformada por el dominio “tierra” y el dominio “flujo”.

A continuación se presenta el modelo a estudiar, donde se representa los sub-dominios utilizados (Fig. 4-13).

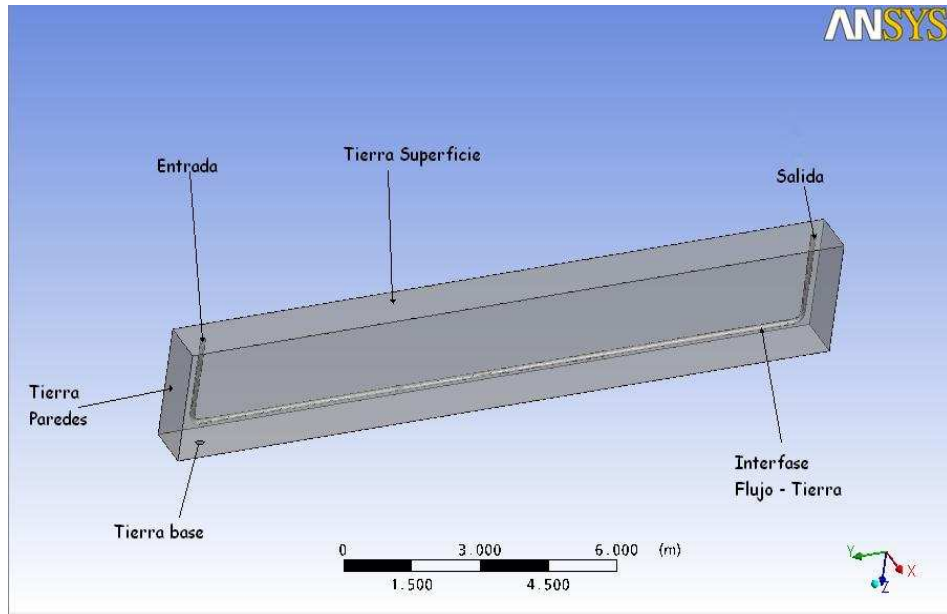


Fig. 4-13 Definición de condiciones de borde. ANSYS® CFX™

En esta sección se detalla la ubicación, el tipo de dominio, y demás variables correspondientes al tipo de dominio, que son determinante para las condiciones de los sub-dominios.

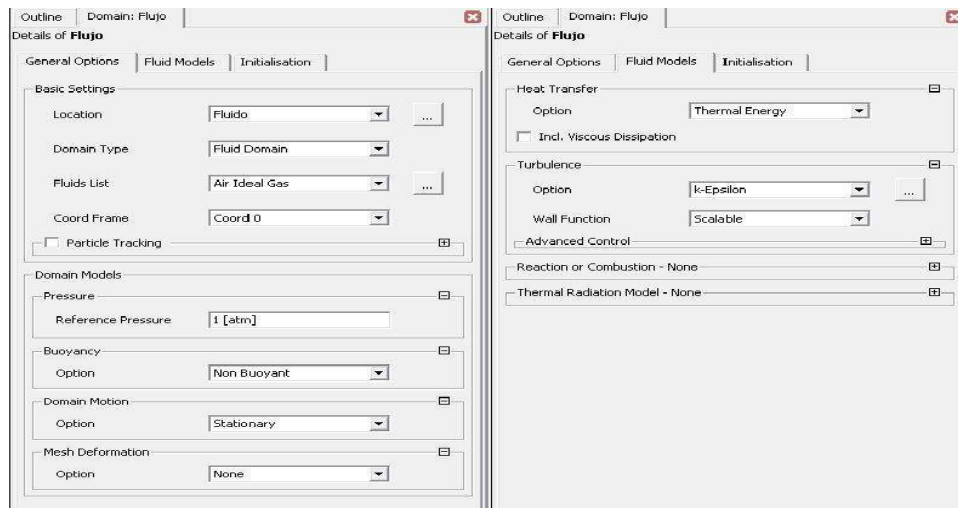


Fig. 4-14 Ventana detalles de dominio. ANSYS® CFX™

Para el modelo fluidodinámico, fue seleccionado un modelo de energía térmica, que se rige por las ecuaciones de cantidad de movimiento, continuidad y energía.

Para el dominio fluido, se tomarán las características del aire (seco), y se dividirán en tres sub dominios, estas condiciones de borde corresponden a sus tres superficies, estas son:

1. “Entrada”, por donde entra el fluido (aire).
2. “Salida”, por donde sale el fluido (aire).
3. “Flujo-Tierra” interfase que está comprendida por la superficie de contacto entre el “flujo” y “tierra”.

Para el sub-dominio “Entrada” (Fig. 4-15) se selecciona la frontera a la cual aplica la condición de borde, así como la condición de entrar hacia la superficie, el tipo de régimen del flujo, la velocidad, turbulencia y la temperatura del aire.

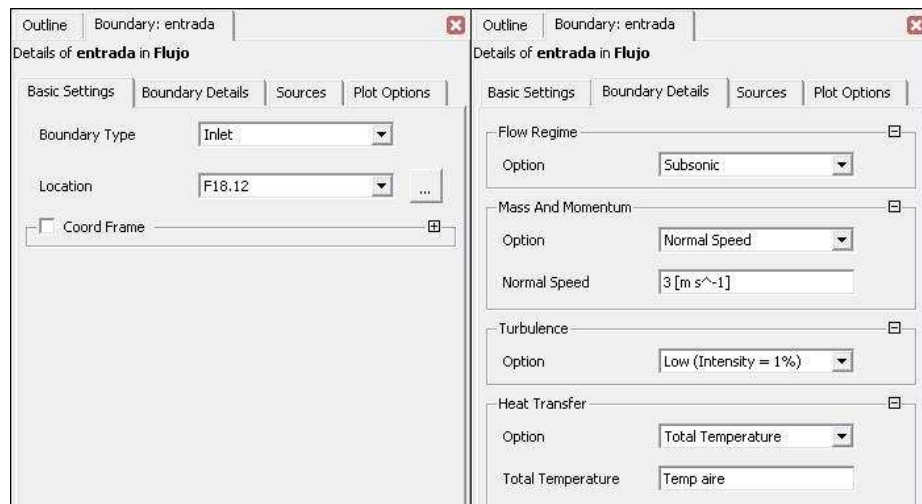


Fig. 4-15 Ventana detalles de sub-dominio. ANSYS® CFX™



En el sub-dominio “Entrada” se seleccionó un flujo subsónico, que es una característica propia del software, para flujos de baja velocidad. Con respecto a la velocidad del aire en la entrada es de 3 m/s constante.

Para la temperatura del aire a la entrada, se realizó una curva de temperatura de aire, denominada “TEMP AIRE”, se modeló en una hoja de cálculo la data experimental proveniente del prototipo a estudiar, la mejor manera fue hacer la curva a trozos, donde se definió en 4 segmentos, desde las 12am hasta las 7am, de 7am hasta las 6:30pm, desde las 6:30pm hasta las 11:30pm, y desde las 11:30pm hasta las 7am del día siguiente. La diferencia de este modelo al otro fue la complejidad de adaptación de las curvas, por lo cual se tuvo que recurrir a otro segmento (Fig 4-19).

Las curvas obtenidas por la hoja de cálculo fueron:

- Desde 0 s a 28800 s la expresión fue “ $y = 2E-13 x^3 - 8E-09 x^2 + 3E-05x + 290,67 \text{ K}$ ”
- Desde 28800 s a 66600 s la expresión fue “ $y = -7E-13 x^3 + 8E-08 x^2 - 0,0025x + 313,6 \text{ K}$ ”
- Desde 66600 s a 84600 s la expresión fue “ $y = 1E-08 x^2 - 0,002x + 384,84 \text{ K}$ ”
- Desde 84600 s a 115200 s la expresión fue “ $y = 8E-09 x^2 - 0,0016x + 365,82 \text{ K}$ ”

Para “Salida” se define la frontera de la superficie, la condición de salir de la superficie, el régimen del flujo subsónico, y la presión relativa a la salida 0 Pa.

Para la interface “flujo-tierra” el ANSYS® CFX™ utiliza la herramienta CHT (Conjugate Heat Transfer/ Flujo de calor conjugado) que se basa en modelar la interacción térmica entre un sólido y un fluido.

A este tipo de dominios se le denomina “Dominios CHT” lo cuales son dominios sólidos que modelan transferencia de calor. Los límites entre los dominios que modelan transferencia de calor tienen temperaturas y flujo térmico calculado, y no debería tener condiciones de borde térmico definido o especificado, por tal razón no se hace en la interfase “flujo-tierra”. ANSYS® CFX™ permite crear las regiones sólidas en las cuales las ecuaciones para la transferencia de calor se solucionen. Dentro de dominios sólidos, la conservación de la ecuación de energía se simplifica puesto que hay flujo dentro de un sólido, así la conducción es el único modo de transferencia de calor.

La conducción de calor a través de los sólidos tiene la siguiente ecuación de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (4.1)$$

donde,  $\rho$ ,  $C_p$  y  $\lambda$  son la densidad, calor específico y la capacidad de conductividad térmica del sólido, respectivamente. Y donde  $S_E$  es la Fuente de energía.

Por otra parte, la influencia de la pared sobre el flujo, sin deslizamiento, y condicionada como sin rugosidad de la pared, y una transferencia de calor como interfase de flujo conservativo.

Para el dominio “tierra”, se tomo las características de suelo húmedo, y se divide en cuatro sub-dominios:

1. “Tierra superficie”, es la frontera que simula el medio ambiente (intemperie).
2. “Tierra paredes” las cuatro caras perpendiculares el sub-dominio “Tierra superficie”.
3. “Tierra base” paralelo a “Tierra superficie” simula al subsuelo.
4. “Tierra-flujo” interfase que comprende la superficie de contacto entre el flujo y la tierra.

En esta se define el tipo de dominio: sólido, el tipo de material, “suelo seco ó húmedo”, transferencia de calor como energía térmica.

Para el sub-dominio “Tierra superficie” se especificó que actúa como una pared, y se define la condición de borde, el cual esta definida por un flujo de calor variable dependiendo de la función “FLUJOCALOR”.

Para el cálculo del flujo de calor, se tomo en cuenta los intercambios convectivos y radiativos de onda corta (incidencia del sol sobre la superficie), donde se utilizo la expresión:

$$\mathbf{q_t} = \mathbf{h_c} ( \mathbf{T_a} - \mathbf{T_s} ) + \alpha \mathbf{E_s} \quad (4.2)$$

$q_t$ : flujo de calor total en cada metro cuadrado de superficie ( $W/m^2$ )

$h_c$ : coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$T_a$ : temperatura del aire

$T_s$ : temperatura de la superficie

$\alpha$ : absorptividad de la superficie ( $\alpha$ : 0,752 para tierra/ Incropera, 1996)

$E_s$ : radiación solar (datos proporcionados por la escuela de Hidrometeorología UCV- Caracas)

Para  $h_c$  se tomaron valores de la tabla 4-2

4.2 Tabla de valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

Fuente: Incropera, F., y DeWitt, D., 1996, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, México.

Proceso	$h_c$ ( $W/m^2 K$ )
Convección libre Gases	2 – 25
Convección libre Líquidos	50 – 1000
Convección forzada gases	25 – 250
Convección forzada líquidos	50 – 20.000
Convección con cambio de fase. Ebullición o condensación.	2500 – 100.000

Para convección forzada para gases se tiene un  $h_c$  entre 25 – 250  $W/m^2 K$ , de los valores de viento obtenidos por la escuela de hidrometeorología, en la cual el promedio para el día de estudio fue de 3 m/s, entonces se tomo un  $h_c$  de 25  $W/m^2 K$ .

Posteriormente se procedió a la construcción de la curva, la cual se realizó de manera análoga a la curva de temperatura de aire en la entrada del flujo.

Inicialmente se partió de modelar en una hoja de cálculo la data recolectada de la ecuación 4-2, la mejor manera fue hacer la curva con los valores obtenidos a trozos, por lo cual se definieron 3 segmentos, desde las 12am hasta las 8am, a partir de este momento se definió que salía el sol, el siguiente segmento de 8am hasta las 6pm, y desde las 6pm hasta las 7am del día siguiente que es el momento donde no esta la presencia del sol, cabe destacar que todos estos valores fueron dados al sistema en segundos.

Las curvas arrojadas por la hoja de cálculo fueron:

- Desde 0 s a 28800 s la expresión fue “ $y = 0 \text{ W/m}^2$ ”
- Desde 28800 s a 64800 s la expresión fue “ $y = -1E-11x^3 - 8E-07x^2 + 0,1414x - 3048,8 \text{ W/m}^2$ ”
- Desde 64800 s a 115200 s la expresión fue “ $y = -398.6144 \text{ W/m}^2$ ”

Para esta última parte se utilizó un valor negativo, debido a que por balance térmico de la tierra, el flujo de calor que ingresaba a ésta debía ser el mismo que salía, por lo tanto se determinó el área total del segundo segmento, para luego ser sustraído la cantidad de área equivalente, y así cumplir con el balance antes mencionado.

Para “Tierra paredes” este sub-dominio trabaja simétricamente como una superficie infinita, y se obvian más detalles automáticamente.

Para el sub-dominio “Tierra base” se especificó el tipo de superficie, que actúa como una pared, y se define la condición de borde, el cual esta definida por un flujo de calor constante que es el proveniente del centro de la tierra igual a  $0,019368 \text{ W/m}^2$  (Miliani, 2009).

Finalmente para “Tierra-flujo” se dice que trabaja como una interfase de tipo fluido - sólido, y una transferencia de calor conservativa.

Luego entramos en una fase de inicializar los dominios, donde se inician las variables a medir con valores exactos (llamados semilla), esto es para que el programa no tarde en realizar lazos para encontrar el valor inicial y no exista tanta diferencia entre la iteración 1 y la 2, para el caso de simulaciones estables el programa puede iniciar con valores aleatorios, mientras que para simulaciones transitorias es necesario la inicialización con sus valores correspondientes de las variables que influyen en el sistema.

Para el presente trabajo se tuvo que evaluar el comportamiento solo del flujo en régimen estable para obtener estas variables de inicialización, como por ejemplo las velocidades  $u$ ,  $v$ ,  $w$ .

A continuación en la pestaña del Solver se presenta 4 ramales:

1. Solver Units, es el sistema que trabajará el SOLVER (S.I).
2. El Solver Control, que define las condiciones en que resolverá las ecuaciones el programa, el número de iteraciones que trabaja 100, el error mínimo aceptado para la convergencia  $1\text{E}-05$  (Fig. 4-16).
3. El Output Control, que define los archivos de auto resguardo y de solución generados (Fig. 4-17).
4. Y el Execution Control.

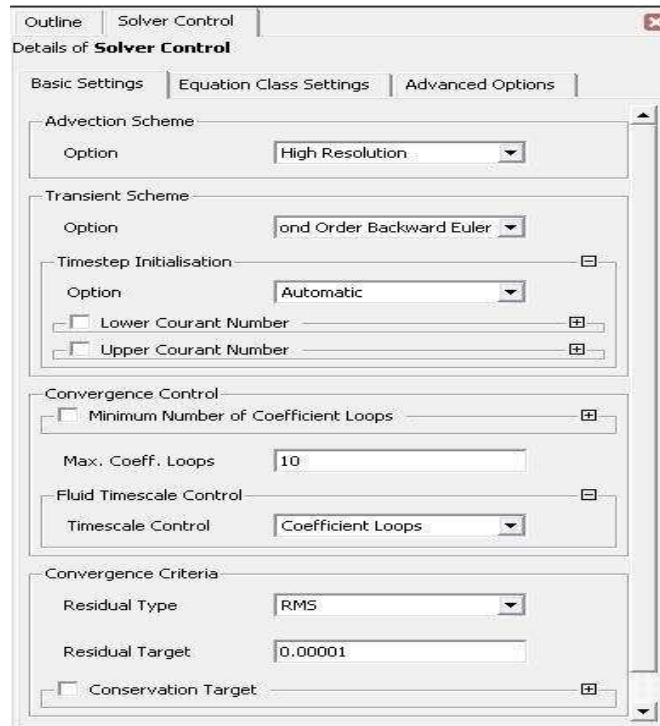


Fig. 4-16 Ventana de modificación del control del Solver-Manager™, ANSYS® CFX™

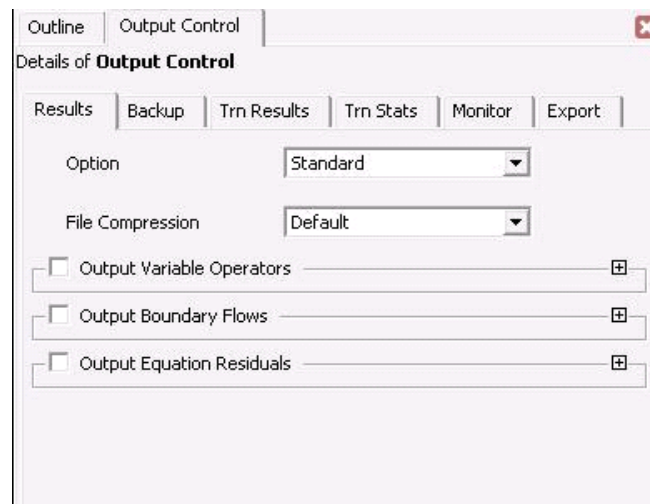


Fig. 4-17 Ventana de modificación del control de data de salida. ANSYS® CFX™

Para definir los materiales que se utilizan en el modelo, existe un ramal donde se tiene la biblioteca de los diferentes materiales con que el programa trabaja, también tiene la opción para definir otros materiales. Para este caso de estudio se definieron los tipos de suelos (húmedo y seco). Se seleccionó “Suelo húmedo” por las características del terreno donde se encuentra el prototipo a estudiar (Fig. 4-18) donde se definió como una sustancia pura con un estado termodinámico sólido, con las siguientes propiedades: una densidad de 1900 kg./m<sup>3</sup> una Capacidad específica de calor de 2200 J/kg. K y una Conductividad térmica de 2 W/m K.

Cabe destacar que se puede dar una especificación mas extensa del material si así se requiere, pero para este caso estos valores fueron suficientes.

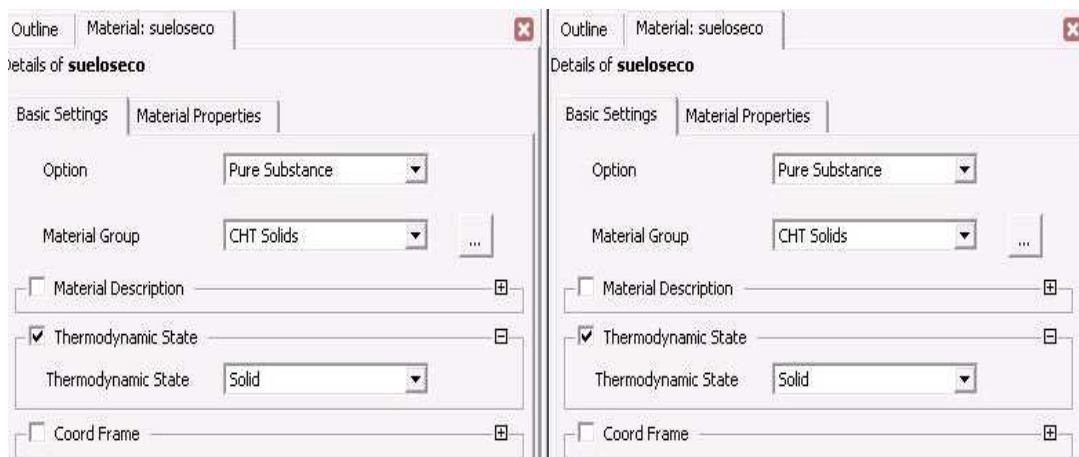


Fig. 4-18 Ventana de modificación de propiedades de material. ANSYS<sup>®</sup> CFX<sup>™</sup>

Finalmente en otro ramal de Expresiones, Variables y Funciones, se definió el comportamiento del Flujo de calor incidente en los sub-dominios de “Tierra superficie” llamado “FLUJOCALOR” (Fig. 4-19) en donde se define una función por partes para el comportamiento del flujo de calor total, y en



“Entrada” en dominio “Flujo” se define otra función para la temperatura ambiente en función del tiempo llamado “Temp aire” (Fig. 4-20).

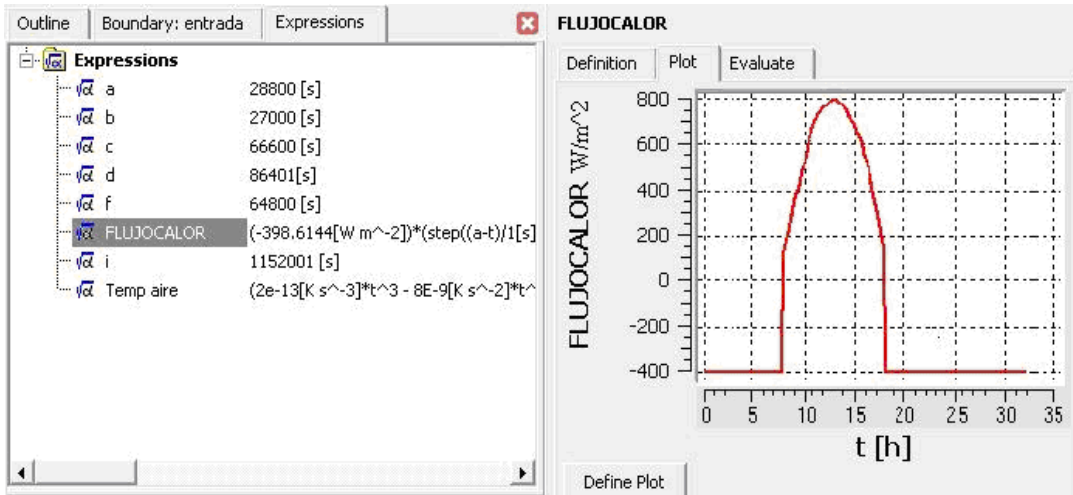


Fig. 4-19 Ventana de creación de expresión “FLUJOCALOR”. ANSYS® CFX™

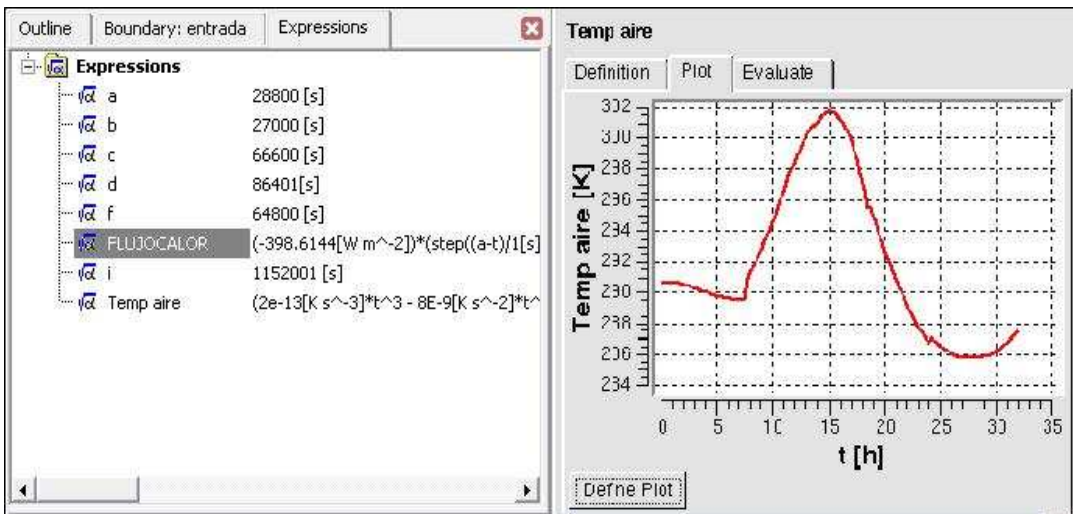


Fig. 4-20 Ventana de creación de expresión “TEMP AIRE”. ANSYS® CFX™

### 4.3.2- CFX-Solver™

Una vez creado todas las condiciones a la cual esta sometido el modelo, como la definición del archivo CFX-Pre™, se procede a introducirlo en el solucionador del ANSYS®. El componente que resuelve el problema de CFD se denomina Solver.

Un problema de CFD se resuelve de la siguiente manera:

1-Sobre cada uno de los volúmenes de control en todo el dominio, se integran las ecuaciones diferenciales parciales, es decir que a cada volumen de control se le aplique una ley de conservación básica.

2-Posteriormente estas ecuaciones integrales se convierten en ecuaciones algebraicas, que fueron solucionadas de forma iterativa, para generar un sistema de aproximaciones para los términos en las ecuaciones integrales.

3-Al ser no lineales las ecuaciones se requirió a un acercamiento iterativo, y al ser un valor aproximado a la solución se dice que convergió, omitiendo un margen de error.

En las siguientes gráficas se pueden observar lo anteriormente mencionado. Las gráficas son en función del margen de error, y de números de iteraciones que se van realizando.

Para las ecuaciones de momento y masa se observa el error que existe entre un paso de tiempo y el paso siguiente esta diferencia es el promedio basado en la raíz cuadrada (RMS) menor o igual a un valor fijado, la diferencia está reflejada en la gráfica, tanto para los ejes en x, y, z y la masa (Fig. 4-21).

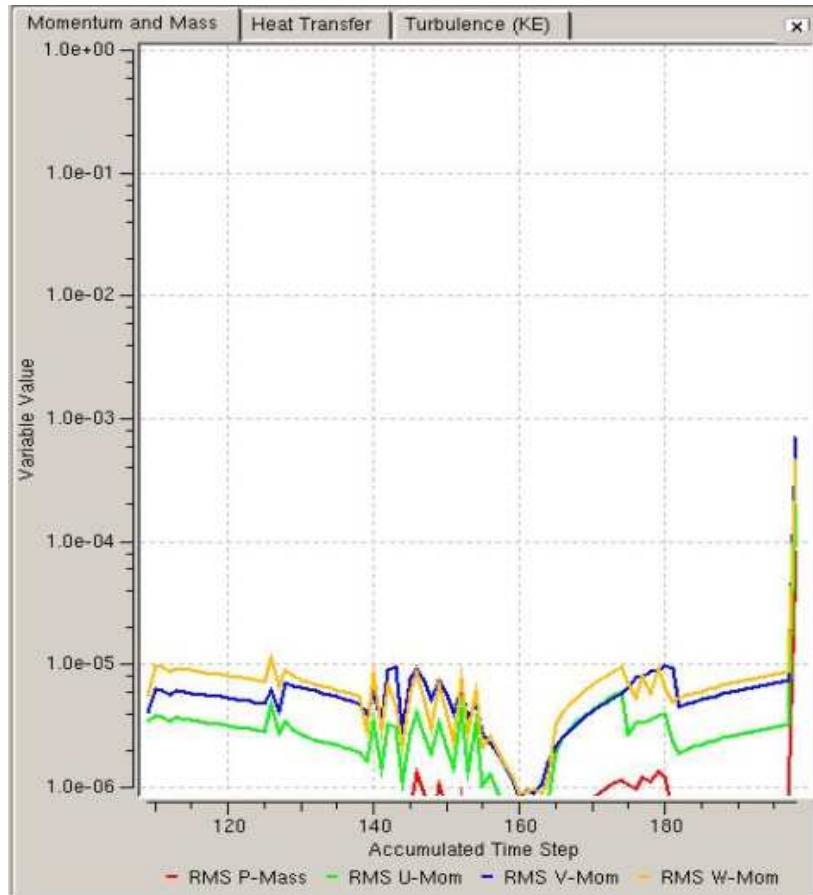


Fig. 4-21 Cálculo de margen de error, para ecuación de continuidad y momentum. ANSYS® CFX™

Este mismo cálculo se realiza tanto para el modelo de transferencia de calor (Fig.4-22) como para el modelo de turbulencia (Fig. 4-23).

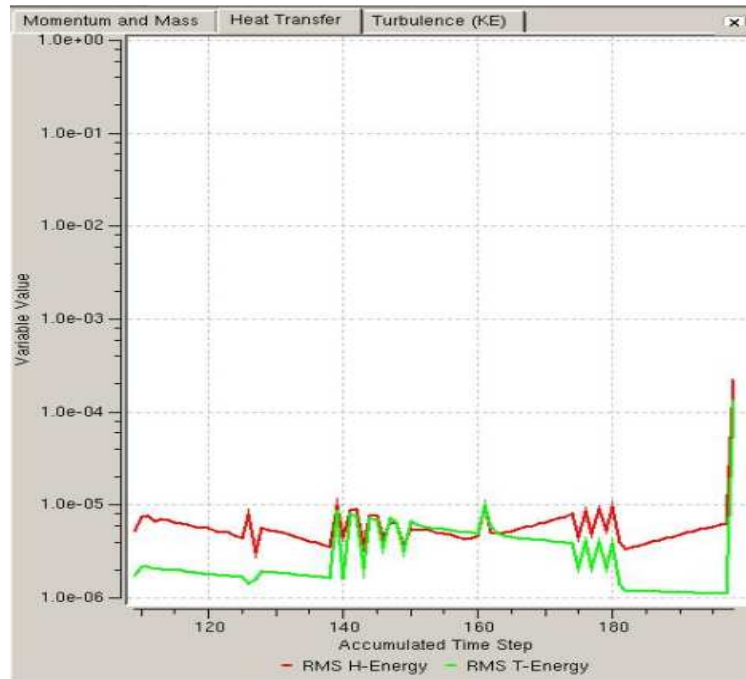


Fig. 4-22 Cálculo de margen de error, para ecuación de energía. ANSYS® CFX™

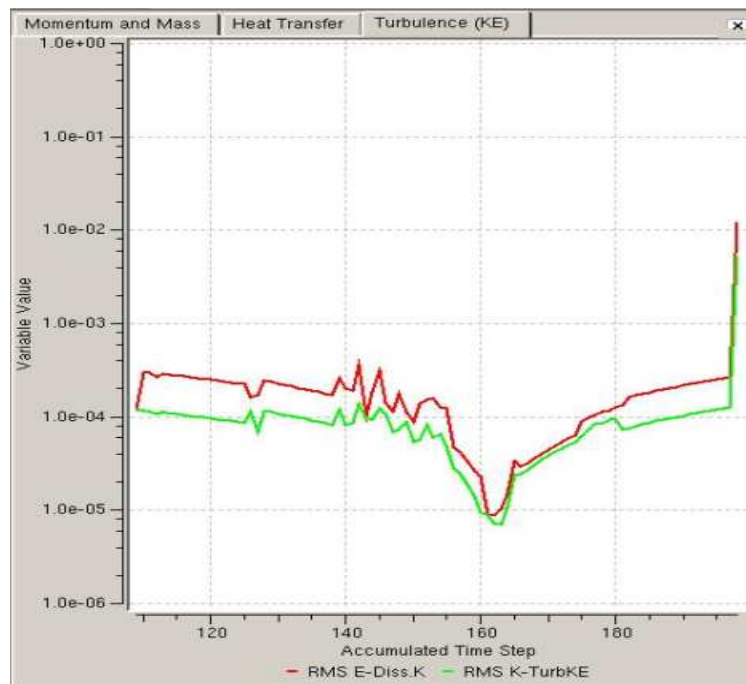


Fig. 4-23 Cálculo de margen de error, para turbulencia. ANSYS® CFX™

### 4.3.3- CFX-Post™

Luego de que el solucionador realiza el proceso iterativo, se produce un archivo de resultados, donde se visualiza, analizan y presentan los efectos de los procesos termodinámicos, térmicos y fluido-dinámicos del modelo.

El Post-procesamiento incluye desde la obtención de valores de los puntos hasta las complejas secuencias animadas, donde se visualizan los resultados cualitativos y cuantitativos.

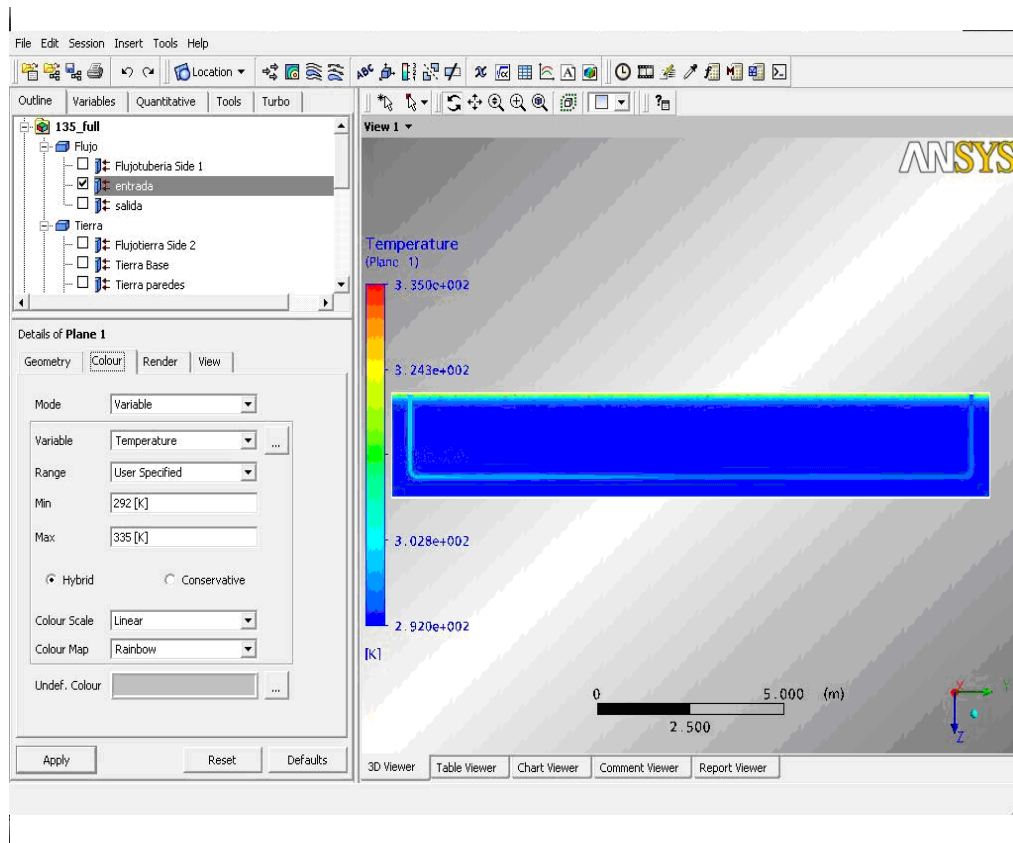


Fig. 4-24 Ventana de visualización de resultados obtenidos. ANSYS® CFX™

#### **4.4- Recurso computacional usado**

Todas las etapas del estudio del modelo fueron realizadas empleando el software CFX<sup>TM</sup>-11.0, desarrollado por ANSYS<sup>®</sup>, el cual implementa el EbFVM. Este software propietario, con licencia de uso para procesamiento secuencial, compartido entre la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV y el Instituto de Mecánica de Fluidos.

Las simulaciones preliminares, hechas con la finalidad de seleccionar los parámetros físicos y numéricos en las simulaciones finales, fueron realizadas en la infraestructura de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, que cuenta con un cluster de 6 CPUs Intel<sup>®</sup> Pentium<sup>TM</sup> 4 de 1.7 GHz, con sistema operativo Linux, distribución Red Hat, conectadas en una red interna, a una velocidad de 100 Mb/s.

Las simulaciones finales fueron realizadas en el cluster del Instituto e Mecánica de Fluidos el cual cuenta con una arquitectura homogénea conformada por 2 nodos maestros y ocho nodos esclavos, cada uno con dos procesadores AMD<sup>®</sup> Opteron<sup>®</sup> CPU 2 GHz (modelo 246 de 64 bits), 12 GB de memoria RAM y tarjeta de red de 2 Gb/s, funcionando con sistema operativo Linux, distribución SuSE. Estas simulaciones se llevaron a cabo con procesamiento secuencial, usando un nodo para cada una de las simulaciones.

## **CAPITULO V**

### **VALIDACIÓN DEL MODELO**

En la investigación planteada, se presentan dos tipos de resultados, los primeros son obtenidos del modelo numérico propuesto para el comportamiento fluido-dinámico y térmico de los sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados, y los segundos fueron extraídos experimentalmente tanto en el montaje realizado en el trabajo del Prof. Ernesto Lorenzo, como en medidos en la escuela de Hidrometeorología UCV-Caracas. Cada grupo de datos será interpretado para luego llevar a cabo una comparación entre los mismos.

Para el análisis adecuado de esta información, es necesario presentarla de manera organizada mostrando los datos más representativos con el objeto de dar respuesta al problema planteado en la investigación.

Una de las principales consideraciones del problema planteado fue adaptar el modelo numérico al comportamiento del prototipo, para ello, se utilizó parte de los datos extraídos de los resultados experimentales con el fin de lograr un mejor ajuste entre los grupos de resultados.

Es importante destacar que al momento de evaluar el comportamiento de los sistemas por conductos enterrados, no se disponía de la información completa necesaria. La más predominante fue la radiación solar, para la que se hizo un ajuste, al día a estudiar.

Se realizaron tres simulaciones variando únicamente diámetros y longitudes.

Datos utilizados para el cálculo numérico de los sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados para el día 11/03/2007 a partir de las 8 a.m. hasta el 12/03/2007 a las 8 a.m.

D<sub>1</sub>: 102 mm (4 pulg), L: 15 m

D<sub>2</sub>: 102 mm (4 pulg), L: 30 m

D<sub>3</sub>: 152 mm (6 pulg), L: 15 m

Tipo de simulación: Transitoria

Tiempo total: De 28800 a 115200 s (1 día)

Dominio Flujo:

Fluido: Aire Seco (propiedades gas ideal)

Flujo turbulento

Presión: 1 atm

Sub-Dominio Entrada:

V: 3 m/s constante

Temperatura Entrada: (Ecuación Temp Aire)

Se presenta la gráfica utilizada para la Temperatura del aire de entrada:



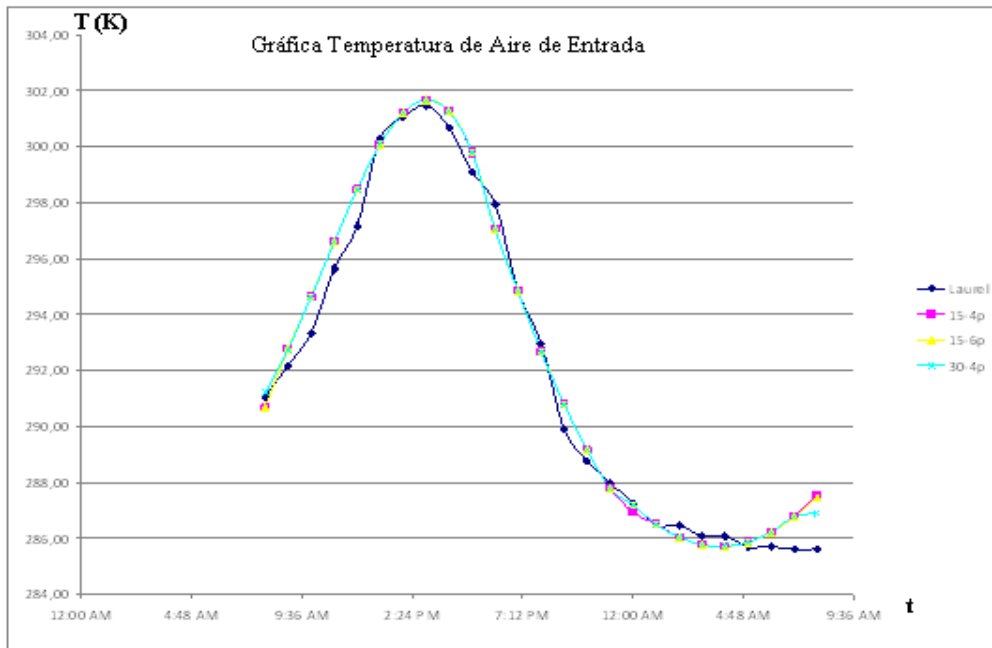


Fig. 5-1. Temperatura del aire de entrada

Dominio Tierra:

Sólido: Suelo húmedo

Propiedades: ( Mills, 1995)

$\rho$ : 1900 kg/m<sup>3</sup>

$C_p$ : 2200 J/kg K

$k$ : 2 W/m K

$\epsilon_s$ : emisividad de la superficie ( para tierra 0,93 – 0,96 / Incropera, 1996)

$\alpha$ : absorptividad de la superficie (para tierra  $\alpha$ : 0,75 / Incropera, 1996)

Sub-dominio “Tierra Superficie”

Flujo de calor: (Ecuación de FLUJOCALOR)

Sub-Dominio “Tierra Base” (Flujo de calor transmitido por el núcleo de la tierra a una profundidad de 2 m de la superficie del suelo)

Flujo de calor: 0,019368 W/m<sup>2</sup> (Miliani, 2009)

Tomando en cuenta todas las consideraciones anteriores, se presentan los resultados de la simulación del modelo numérico en ANSYS® CFX™, donde se presentan tablas y gráficas asignando distintas variables que intervienen en el comportamiento del modelo por conductos enterrados, descritas anteriormente como flujo de calor, temperatura de aire de entrada, velocidad de entrada de flujo, entre otras.

Primero se muestra la tabla de resultados obtenidas de temperaturas de salida del aire, tanto para el modelo experimental (Laurel) como para el modelo numérico (ANSYS® CFX™).

Tabla 5.1 Resultados temperatura de salida

	Salida 15m 4pulg			Salida 15m 6pulg			Salida 30m 4pulg		
	Laurel (K)	ANSYS® CFX™ (K)	error	Laurel (K)	ANSYS® CFX™ (K)	error	Laurel (K)	ANSYS® CFX™ (K)	error
8:00 AM	293,72	293,27	0,15	292,19	292,67	0,16	294,10	293,22	0,30
9:00 AM	293,72	293,32	0,14	292,19	293,20	0,34	294,10	293,46	0,22
10:00 AM	293,72	293,61	0,04	292,57	293,79	0,42	294,10	293,52	0,20
11:00 AM	294,10	293,95	0,05	293,72	294,47	0,26	294,10	293,70	0,14
12:00 PM	294,48	294,32	0,05	294,48	295,16	0,23	294,10	293,89	0,07
1:00 PM	294,48	294,68	0,07	295,24	295,78	0,18	294,10	294,08	0,01
2:00 PM	294,86	294,99	0,04	295,63	296,27	0,22	294,48	294,26	0,08
3:00 PM	294,86	295,21	0,12	295,63	296,57	0,32	294,48	294,40	0,03
4:00 PM	294,86	295,30	0,15	296,01	296,59	0,20	294,48	294,49	0,00
5:00 PM	294,86	295,24	0,13	295,63	296,27	0,22	294,48	294,50	0,01
6:00 PM	294,86	294,96	0,03	294,86	295,50	0,22	294,48	294,42	0,02
7:00 PM	294,48	294,58	0,03	293,72	294,75	0,35	294,48	294,23	0,08
8:00	294,10	294,21	0,04	293,34	294,01	0,23	294,10	294,20	0,03

PM									
9:00 PM	294,10	293,86	0,08	292,96	293,32	0,12	294,48	293,90	0,20
10:00 PM	294,10	293,54	0,19	292,57	292,70	0,04	294,48	293,75	0,25
11:00 PM	293,72	293,24	0,16	292,19	292,15	0,01	294,10	293,60	0,17
12:00 AM	293,72	292,99	0,25	291,81	291,81	0,00	294,10	293,60	0,17
1:00 AM	293,72	292,81	0,31	291,43	291,48	0,02	294,10	293,35	0,25
2:00 AM	293,34	292,63	0,24	291,43	291,21	0,08	294,10	293,25	0,29
3:00 AM	293,34	292,48	0,29	291,05	291,01	0,01	294,10	293,17	0,32
4:00 AM	293,34	292,36	0,33	291,05	290,87	0,06	294,10	293,09	0,35
5:00 AM	293,34	292,27	0,36	291,05	290,81	0,08	294,10	293,01	0,37
6:00 AM	293,34	292,22	0,38	291,05	290,83	0,08	294,10	292,95	0,39
7:00 AM	293,34	292,19	0,39	292,57	290,92	0,56	294,10	292,90	0,41
8:00 AM	293,34	292,20	0,39	292,57	291,06	0,51	294,10	292,88	0,42

Las gráficas que se muestran a continuación presentan curvas de “Temperaturas de salida del aire” vs “Tiempo”, donde se puede apreciar la diferencia entre el modelo experimental y el modelo numérico. Además se puede observar el comportamiento en la grafica con una ampliación de la misma, entre los rangos de desempeño. Las graficas están representadas en temperaturas absolutas (K) y el tiempo simplificado en horas (h).

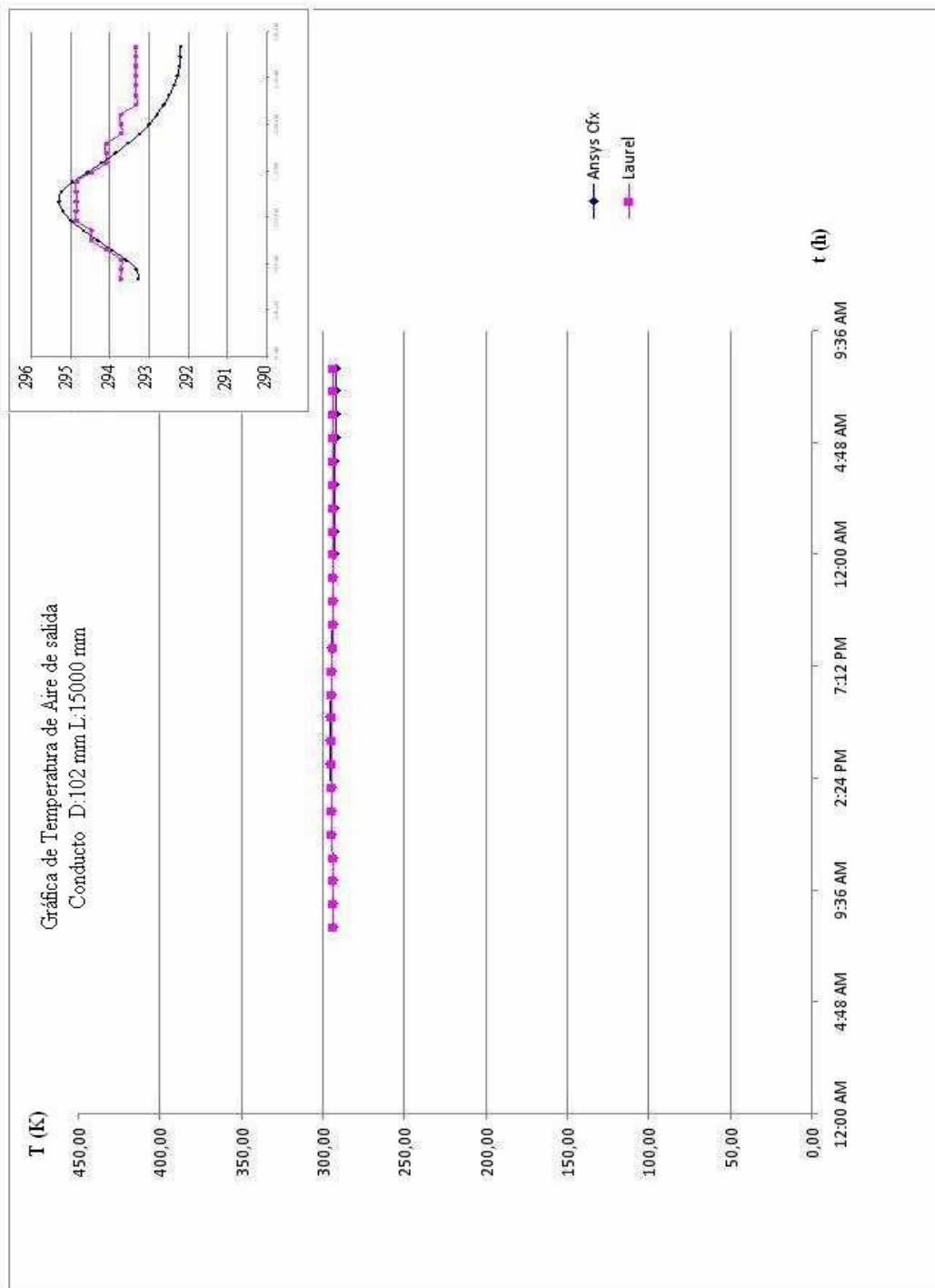


Fig. 5-2 Temperatura del aire de salida para conducto D:102 mm, L: 15 m

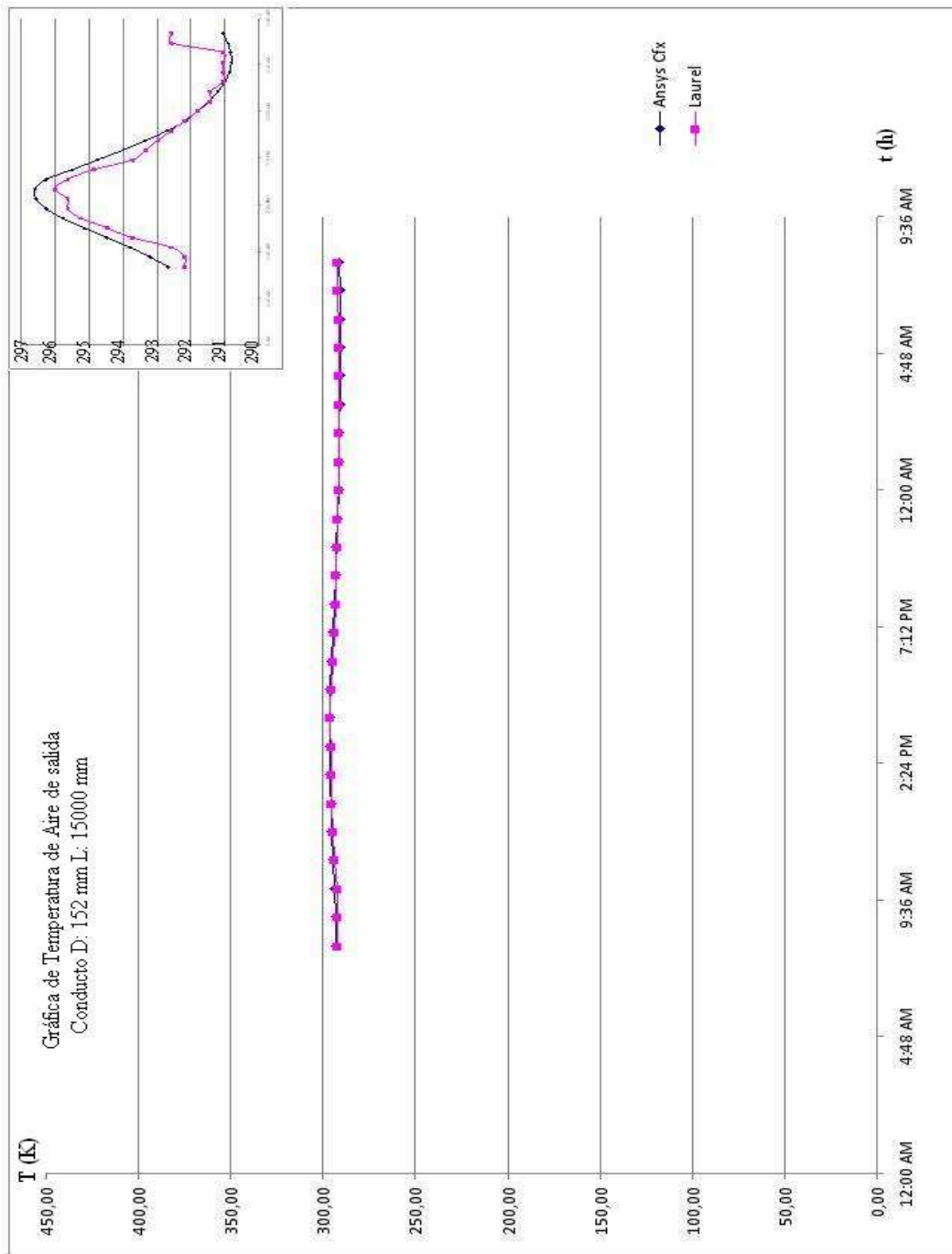


Fig.5-3 Temperatura del aire de salida para conducto D:152 mm, L: 15 m

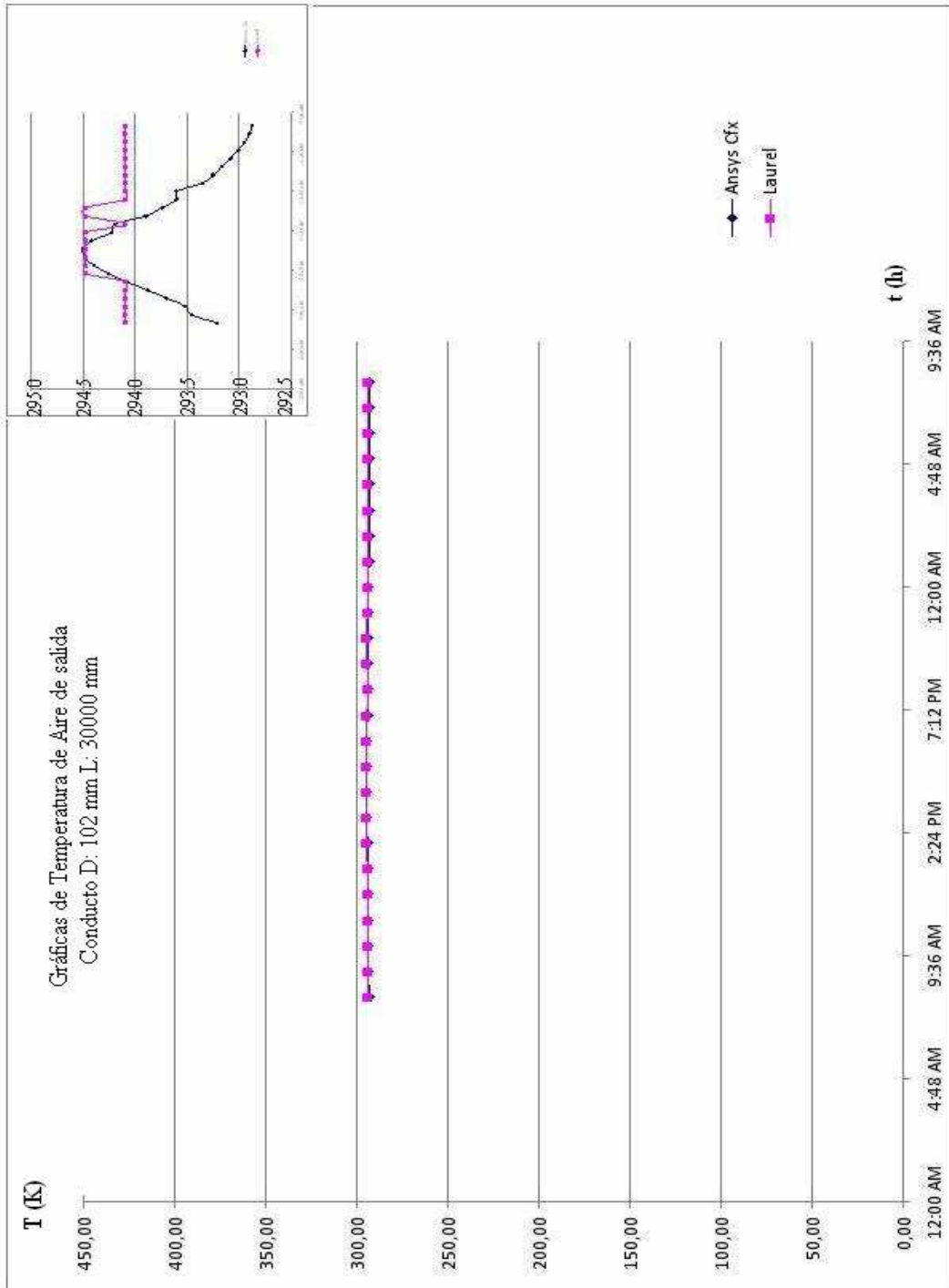


Fig. 5-4 Temperatura del aire de salida para conducto D:102 mm, L: 30 m

En las Fig. 5-2, Fig. 5-3, Fig. 5-4 se observa en las graficas, que en las primeras horas, las curvas de resultados numéricos muestran una buena aproximación al modelo experimental.

A partir de la hora 08:00 p.m. se aprecia una diferencia notable, pero aceptable, ya que las curvas reflejan un comportamiento similar. Esta diferencia es debido a que en la condición inicial de la simulación, la temperatura de la tierra se definió como constante para todo nivel de profundidad (20,19 °C), y a medida que el sistema fue transcurriendo en el tiempo, la temperatura del aire en la entrada, más la radiación solar incidente sobre la superficie del suelo, hicieron que la tierra presentara un comportamiento térmico similar al real. Teniendo en cuenta que existe un perfil de temperatura complejo de condición inicial para el comportamiento de la tierra, y que se tenía planteado simular el sistema por varios días para alcanzar esta condición de equilibrio en la tierra, pero al ser el tiempo de simulación elevado se optó por tomar solo el primer día modelado.

Cabe destacar que la curva modelada para la condición de temperatura de entrada del aire, no es suave y continua, en todo su dominio, por lo cual afecta los resultados.

A pesar de esto los errores relativos entre el modelo experimental y el modelo numérico presentan un margen mínimo, inferior a la unidad, que a nivel de resultados reportados por programas computacionales es aceptable.

A continuación se comparan dos gráficas (Fig. 5-5 y 5-6), de los tres tipos planteados del sistema, para el modelo numérico y el modelo experimental, en las cuales se evalúa la eficiencia de cada tipo de sistema y en

cada una se representan curvas de “Temperaturas de salida del aire” vs “Tiempo” y “Temperatura exterior” (temperatura de entrada) vs “Tiempo”.



Gráficas Temperatura de Salida reportadas Ansys CFX

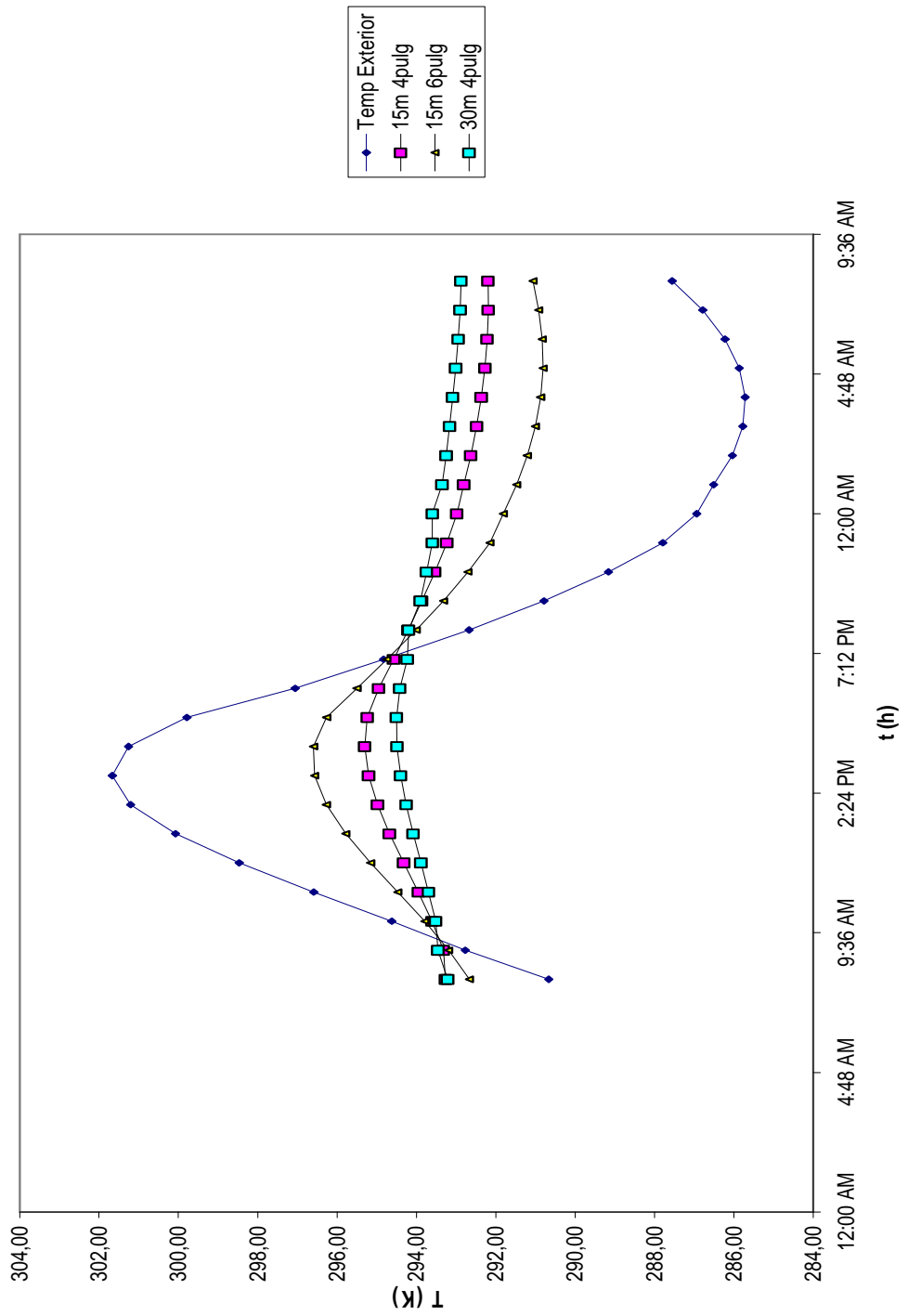


Fig. 5-5 Comparación temperatura del aire de salida con temperatura exterior, de ANSYS® CFX™

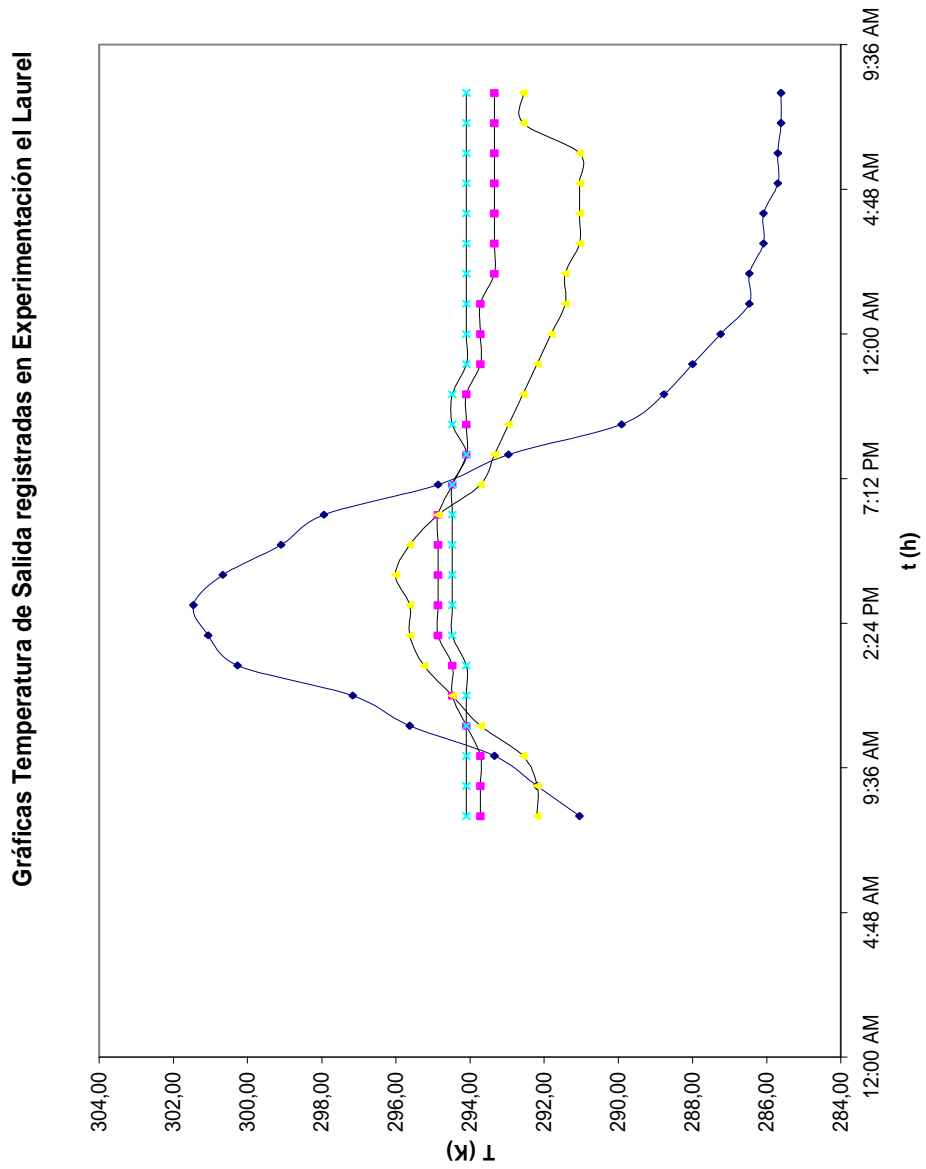


Fig. 5-6 Comparación temperatura del aire de salida con temperatura exterior, de Laurel

De la comparación de las dos gráficas, se puede apreciar que el sistema de D: 102mm y L: 30 m, presenta el comportamiento más eficiente, obteniendo una reducción importante de la temperatura. Que coincide con los datos reportados por el modelo experimental.

### 5.1- COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA TIERRA

Se realizó un estudio del comportamiento térmico del suelo para todas las horas registradas. Estos estudios comprenden la variación de la temperatura en función de la profundidad, presentándose a continuación los comportamientos extremos registrados durante el día a estudiar (Fig. 5-7).

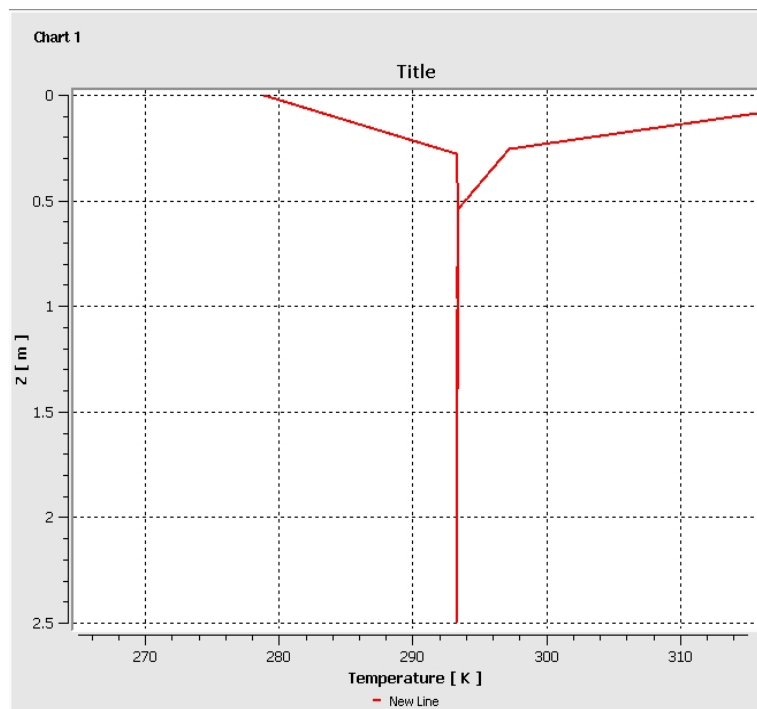


Fig. 5-7 Comportamiento térmico del suelo. ANSYS® CFX™

Se puede observar la variación de temperatura hasta el metro de profundidad. Durante las horas iniciales del día, se observa un proceso de calentamiento gradual debido al inicio de radiación solar, mientras que al momento de la ausencia de luz solar, el proceso comienza a invertirse, debido a la radiación difusa modelada.

Se realizó una comparación de este resultado con el obtenido en el estudio de Sánchez, 1991, (Fig. 5-8) donde se practicó una recolección de data durante 8 años de la variación de la temperatura del suelo a un rango de profundidad, donde fueron registradas las temperaturas medias mensuales, y definiendo que en Venezuela se encuentra en un régimen isotérmico, debido a la reducida variación durante el año, y solo en el primer metro de profundidad presentan características notables.

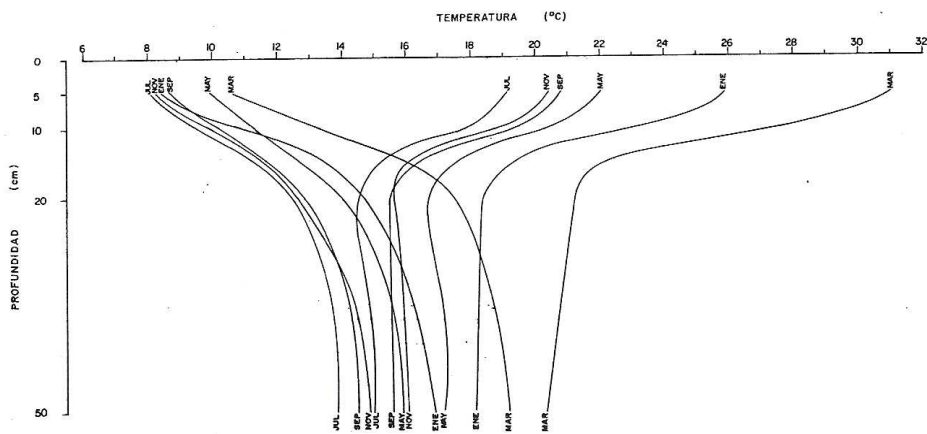


Gráfico 4-B. Perfil térmico del suelo - Maracay, Campo Experimental del CENIAP. Promedio de temperaturas máximas y mínimas mensuales entre 5 y 50 cm). Lat.: 10°15'N Alt.: 450 m Período: 1980/87.

Fig. 5-8 Comportamiento térmico del suelo. Sánchez, 1991

Realizando comparación entre las dos gráficas, se puede observar la similitud entre el comportamiento de ambos. Finalmente se puede decir que esto corresponde directamente a los valores de radiación recibida en cada lugar, y que es posible una mayor variación debido al tipo de suelo y la altitud del lugar.

Las temperaturas a partir de 0.75 m de profundidad muestran diferencias muy pequeñas, y prácticamente no varía, omitiendo la parte cercana a la tubería.

Los máximos gradientes de temperatura se observan en los primeros 5 cm., y a 100 cm se puede denominar como nivel de referencia debido a que no existe casi variación.

## **5.2- COMPORTAMIENTO FLUIDO-DINÁMICO DEL AIRE**

Se realizó un estudio simple del comportamiento fluido dinámico del flujo a través del conducto. Mostrando una velocidad casi constante a través de todo el tramo.

En el codo de entrada se observan pérdidas al salir del codo (Fig. 5-9).

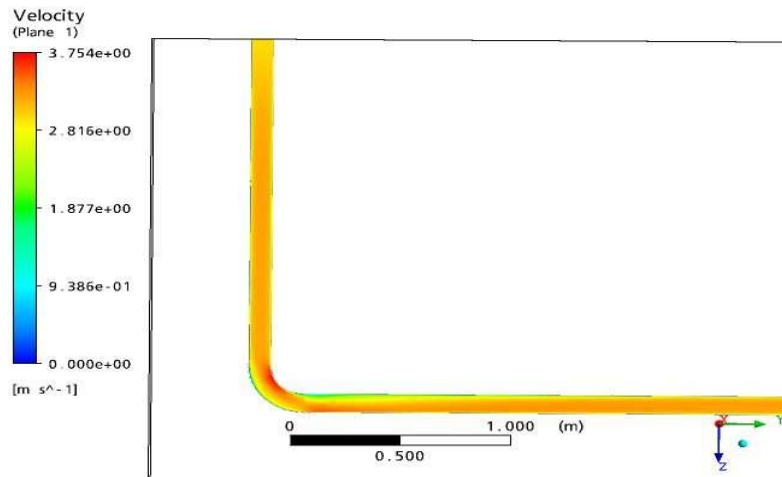


Fig. 5-9 Velocidad de fluido

En un análisis más detallado tanto del codo de entrada (Fig. 5-10), como el codo de salida (5-11) se observa que las mayores velocidades se obtienen en la parte interna del codo, lo que era de esperarse, y consecuentemente una zona turbulenta que disminuye la velocidad del flujo.

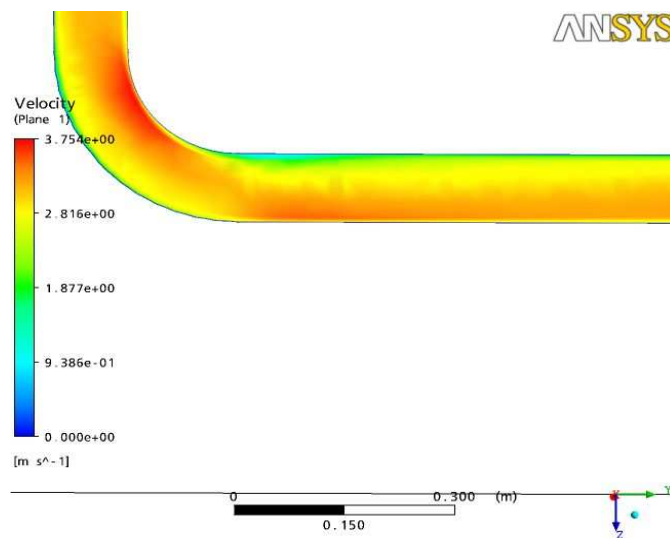


Fig. 5-10 Velocidad del aire en codo de entrada

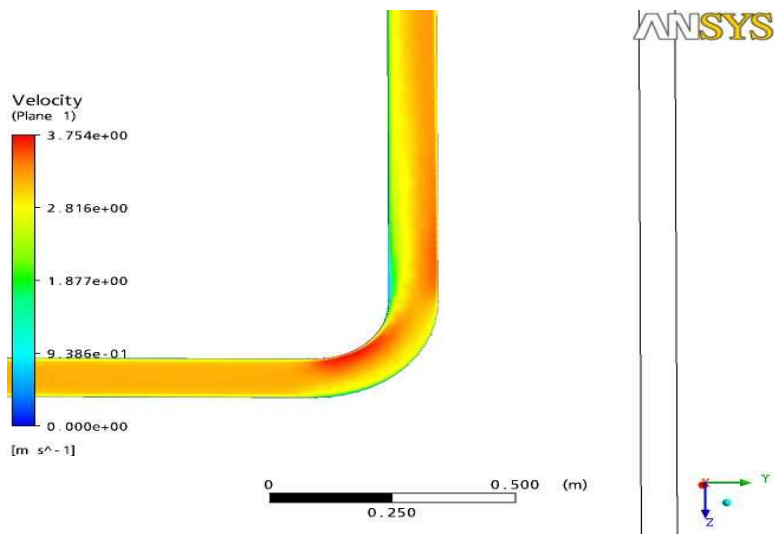


Fig. 5-11 Velocidad del aire en codo de salida

Finalmente en la Fig. 5-12 se observa una sección del tramo horizontal de la tubería, donde se observa el perfil de velocidades en el flujo, mostrando la capa límite, el espesor de la capa límite en los bordes de la tubería, y el fluido completamente desarrollado en el eje de la tubería.

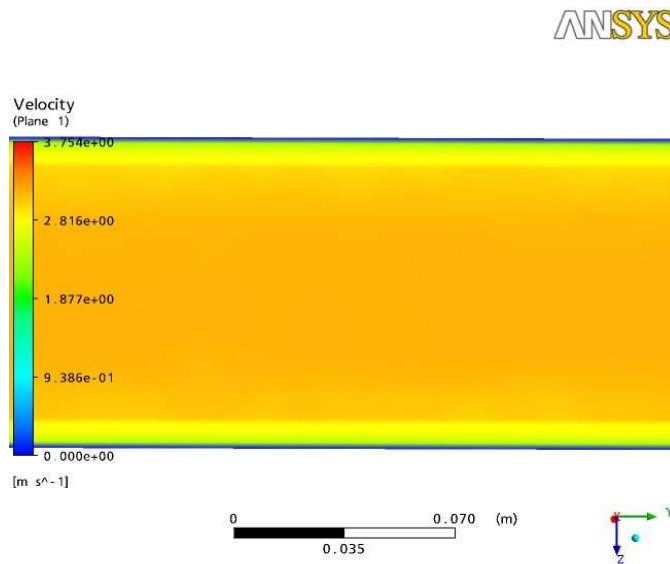


Fig. 5-12 Perfil desarrollado de la velocidad del aire

## CONCLUSIONES

- El modelo matemático empleado describe adecuadamente el comportamiento fluido-dinámico y térmico, de los sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados.
- El método de volúmenes finitos basado en elementos permite resolver el modelo matemático planteado, obteniendo resultados esperados, y así validar la aplicación de simulaciones computacionales para los sistemas pasivos de climatización por conductos enterrados, con los resultados del modelo experimental. Sin embargo la complejidad de la geometría del modelo hace que requiera un tiempo de cómputo alto (entre 14 y 72 horas aproximadamente).
- Los parámetros de mayor influencia en el desempeño del sistema son la temperatura del aire a la entrada y de la tierra, ya que la diferencia de temperaturas entre ambos determinará la tasa de transferencia de calor que se establecerá en el sistema y la variación en la temperatura del aire, que es el objetivo principal que persigue el mismo.
- El diámetro de los conductos es un factor influyente en la eficiencia del sistema, ya que a menor diámetro, aumenta la eficiencia del sistema.
- A mayor longitud del conducto, el rendimiento del sistema aumenta. Existe una longitud máxima a partir de la cual cualquier aumento influye muy poco en la temperatura de salida del aire por lo que se hace poco conveniente económicamente.



- De la información recolectada y de los resultados de las simulaciones, sobre la temperatura del suelo, se observó que el flujo de calor que entra a la superficie del suelo afecta hasta 0.75 m, para luego tender a temperaturas constantes.

## **RECOMENDACIONES**

Este trabajo se ha desarrollado inicialmente para obtener una herramienta computacional fundamentada en investigaciones de sistemas de conductos enterrados en el país, pero una vez analizada se pensó en una serie de recomendaciones que ayudarían a incrementar la confiabilidad y factibilidad del modelo.

- La introducción de bases de datos para más condiciones del sistema, realizar mediciones para obtener valores de radiación, suelo, otros, para las propiedades de distintos tipos de fluidos, materiales de los conductos, logrando así una matriz de datos que permitirá elaborar correlaciones experimentales del comportamiento de los sistemas pasivos de climatización.
- Tomar muestras de los suelos donde se van a implementar estos sistemas por conductos enterrados, analizando su composición, y a su vez saber las propiedades térmicas del mismo, que tienen gran influencia en el comportamiento térmico del sistema.
- Se recomienda para estudios posteriores, analizar el comportamiento termodinámico del sistema, realizando simulaciones en flujo bifásico para el caso de humedad relativa del aire de circulación y a su vez analizar si existe condensación en el sistema.

- Realizar simulaciones, para analizar el comportamiento de estos sistemas, con la aplicación de aletas para observar como afecta en la eficiencia.
- Utilización de aislantes a la salida del conducto, debido a que incrementa la temperatura del aire de salida.
- Antes de utilizar cualquier programa de generación de mallas, se recomienda verificar el número de elementos máximos con el que se puede trabajar, de acuerdo a la memoria RAM que se dispone.
- Verificar el tipo de malla a utilizar dependiendo el tipo de geometría para la obtención de mejores resultados.
- Formalizar un laboratorio de simulación numérica en la EIM, donde se resuelvan, no solo problemas en el área de energética, sino también en las demás áreas propias de ingeniería mecánica. Dicho laboratorio debería estar separado físicamente de la sala de tesis de la misma escuela, a fin de evitar que se afecte actividades de alguna de las partes.
- Incorporar el laboratorio de simulación numérica de la EIM al cluster del IMF, así como también a otros centros de cómputo intensivo, dentro y fuera del país, con la intención de poder procesar, en tiempos de cómputos aceptables, simulaciones que se acerquen más a la realidad y a las necesidades de la ingeniería.
- Incluir en el plan de estudios de los cursos de pre-grado de la EIM, mayor participación de los métodos numéricos en la solución de problemas inherentes a las materias dictadas.

## .REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS® CFX Solver™ (2005) Release 11.0: Theory.
- ANSYS® CFX Solver™ (2005) Release 11.0: Modeling.
- Brajam, Das, 1999, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*.
- Cengel, Y. Boles, M., 1996, *Termodinámica*, 2da edición. Editorial Mc Graw Hill. C. México.
- Escuer, Joan, *Intercambiadores Tierra-Aire en la climatización de construcciones. Pozos provenzales y técnicas emparentadas*. <http://www.geoconsultores.org/ficheros/891923b522b238cae5db7601bc82a93b.pdf> . [Consulta 2008, Noviembre]
- Fox, R., y McDonald, A., 1995, *Introducción a la Mecánica de Fluidos*, 4ta edición. Editorial Mc Graw Hill. México.
- Gonzalez, De Vallejo y J. Luis, 2002, *Ingeniería Geológica*, Editorial Pearson Prentice Hall. México.
- Hollmuller, P., Lamberts, R., Westphal, F., Ordenes, M. y Carlo, J., 2005, *Potential of inertial ventilation for passive cooling in brazilian climates*. Sao Paulo, Brazil.
- Hobaica, M., Belarbi, R. y Rosales, L., 2001, Los sistemas pasivos de refrescamiento de edificaciones en clima tropical húmedo. *Tecnología y Construcción* 17-1, IDEC-FAC-UCV. Caracas.
- Hobaica, M., 1984, Caractéristiques de zones climatiques du Venezuela pour le conception thermiques de constructions. Tesis de Maestría. *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*. París.
- Hobaica, M. y Allard, F., 2007, *Integración de sistemas pasivos de acondicionamiento térmico en Venezuela (ISPAVEN)*. Programa de cooperación inter universitario. PCU-FONACIT-ECOSNORD. Compromiso 9269. IDEC-FAC-UCV, laboratorio de estudio de fenómenos de transferencia aplicados a la edificación. (LEPTAB) Polo Ciencias y Tecnología. Universidad de la Rochelle.
- J.P. Holman, 1999, *Transferencia de calor*. Editorial Continental, México.

- Incropera, F., y DeWitt, D., 1996, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4ta edición. Editorial Prentice Hall, México.
- Ingersoll y Rand, 1981, *Cameron Hydraulic Data*, C.R. Westaway and A.W. Loomis, 2<sup>da</sup> Edición, Estados Unidos.
- Kreith F., 1965, *Principles of Heat Transfer*, 2da edición. Editorial *Internacional Textbook Company*. Pennsylvania.
- Lorenzo, E., 2007, Climatización pasiva por conductos enterrados. Tesis de especialización, IDEC-FAC-UCV. Caracas.
- Lorenzo, E., Hobaica, M.E. y Conti, A., (2008). Desarrollo experimental de un prototipo del sistema de tubos enterrados. *Tecnología y Construcción*, Vol. 24, N° I. 142 p.
- Maliska, C., (2004), *Transferencia de Calor e Mecánica dos fluidos Computacional*, 2da ed. Florianópolis, Brasil: Livros Técnicos e Científicos Editora. 453 p.
- Miliani, L., (2009), Empleo de Modelo Unificado para Calcular la Distribución de temperaturas en Tuberías Verticales para Flujo Bifásico. Tesis M.Sc. Ingeniería Mecánica. Tutores: Malpica, F. y Segura, J. Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Mills, Anthony F.(1995), *Transferencia de calor*, Editorial Irwin, México.
- Müller, E., 2002, *Termodinámica Básica*, 2da edición. Editorial Equinoccio. Caracas.
- Munson, B., Young, D. y Okiishi T., 1990, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Editorial Wiley. Estados Unidos
- Potter, M., Wiggert, D. y Hondzo, M., 1998, *Mecánica de los Fluidos*, 2da edición. Editorial Prentice Hall. Ciudad de Oregon.
- Ravigururajan, T.S. y Bergles, A., 1996, *Experimental thermal and Fluid science*, vol 13, no. 1, pp. 55-70.
- Ramírez, J., 2005a, Proyecto Almacenes Alkosto. Villavicencio, Colombia.
- Ramírez, J., 2005b, Proyecto Almacenes FASA. S.A. Chile.

- Rosales, L., 2007, Zonas climáticas para el diseño de edificaciones y diagramas bioclimáticos para Venezuela. *Tecnología y Construcción*. [online], vol.23, no.1 [citado 06, Mayo, 2009], p.45-60. Disponible en la World Wide Web: <[http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-96012007000100005&lng=es&nrm=iso](http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-96012007000100005&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 0798-9601. . [Consulta 2009, Febrero]
- Sánchez, C., Jesús, 1991, Régimen térmico del suelo en Venezuela, Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias y Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 48 p.
- Sigalés, B., 2003, *Transferencia de Calor Técnica*, Volumen 1, Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España.
- Silvana, F., Celina, F. y Graciela, L., 2002, Análisis del *performance* de los ductos enterrados en una escuela EGB3. Catriló, Argentina.
- Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Comisión de Bibliotecas (2005). Instructivo para la presentación de tesis de pregrado, postgrado, doctorado y trabajos de ascenso. Caracas.
- Van Wylen, Sountag G., 1999, *Fundamentos de Termodinámica*, 2da edición. Editorial Limusa-Wiley. México.
- Welty, J., *Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería*. Editorial Limusa-Noriega, México.

## APENDICE A

Valores temperatura de aire de entrada.

Entrada							
	Laurel (K)	15m 4pulg (K)	erro r	15m 6pulg (K)	erro r	30m 4pulg (K)	erro r
8:00 AM	291,05	290,67	0,13	290,67	0,13	291,22	0,06
9:00 AM	292,19	292,77	0,20	292,77	0,20	292,76	0,20
10:00 AM	293,34	294,62	0,44	294,63	0,44	294,62	0,44
11:00 AM	295,63	296,59	0,32	296,59	0,33	296,59	0,32
12:00 PM	297,16	298,47	0,44	298,48	0,44	298,47	0,44
1:00 PM	300,27	300,07	0,07	300,08	0,06	300,08	0,06
2:00 PM	301,06	301,20	0,05	301,22	0,05	301,21	0,05
3:00 PM	301,46	301,66	0,07	301,68	0,07	301,67	0,07
4:00 PM	300,67	301,26	0,19	301,27	0,20	301,26	0,20
5:00 PM	299,10	299,79	0,23	299,80	0,23	299,79	0,23
6:00 PM	297,94	297,06	0,30	297,07	0,29	297,06	0,30
7:00 PM	294,86	294,83	0,01	294,83	0,01	294,83	0,01
8:00 PM	292,96	292,68	0,10	292,68	0,09	292,68	0,10
9:00 PM	289,91	290,79	0,30	290,79	0,30	290,79	0,30
10:00 PM	288,77	289,16	0,14	289,17	0,14	289,16	0,14
11:00 PM	288,00	287,79	0,07	287,80	0,07	287,79	0,07
12:00 AM	287,24	286,94	0,10	287,20	0,02	287,20	0,02
1:00 AM	286,47	286,51	0,02	286,51	0,02	286,51	0,02
2:00 AM	286,47	286,04	0,15	286,04	0,15	286,04	0,15
3:00 AM	286,08	285,78	0,11	285,77	0,11	285,78	0,11
4:00 AM	286,08	285,72	0,13	285,71	0,13	285,72	0,13
5:00 AM	285,70	285,87	0,06	285,86	0,06	285,87	0,06
6:00 AM	285,70	286,22	0,18	286,22	0,18	286,22	0,18
7:00 AM	285,61	286,79	0,41	286,78	0,41	286,79	0,41
8:00 AM	285,61	287,56	0,68	287,45	0,65	286,90	0,45

## APENDICE B

Resumen climatológico estación UCV-Caracas. Temperatura diferentes profundidades del suelo.

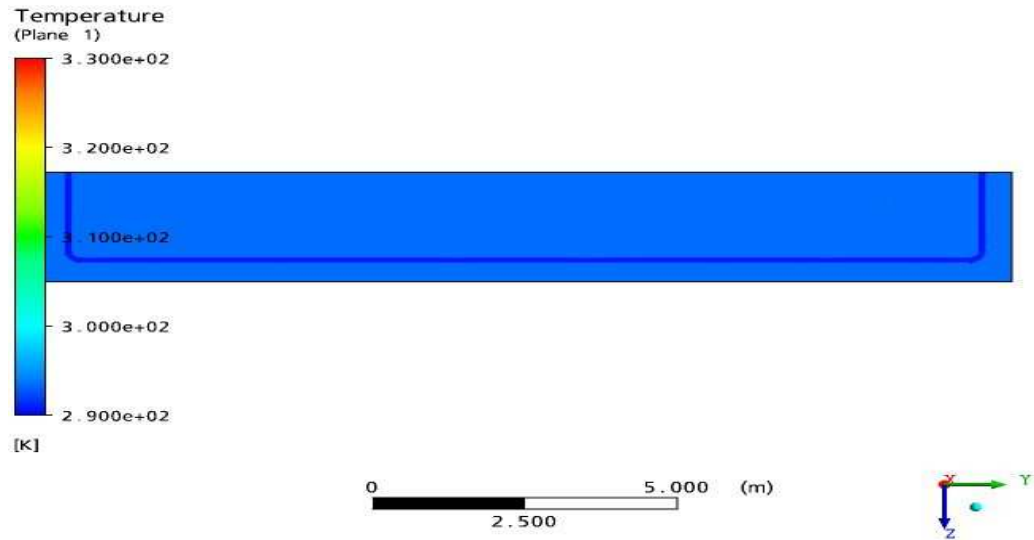
Situación  
 Latitud: 10°29`41`` N  
 Longitud: 66°53`12`` W  
 Altitud: 884.68 msnm

RESUMEN CLIMATOLOGICO  
 Estación UCV (0539)  
 Año: 2008

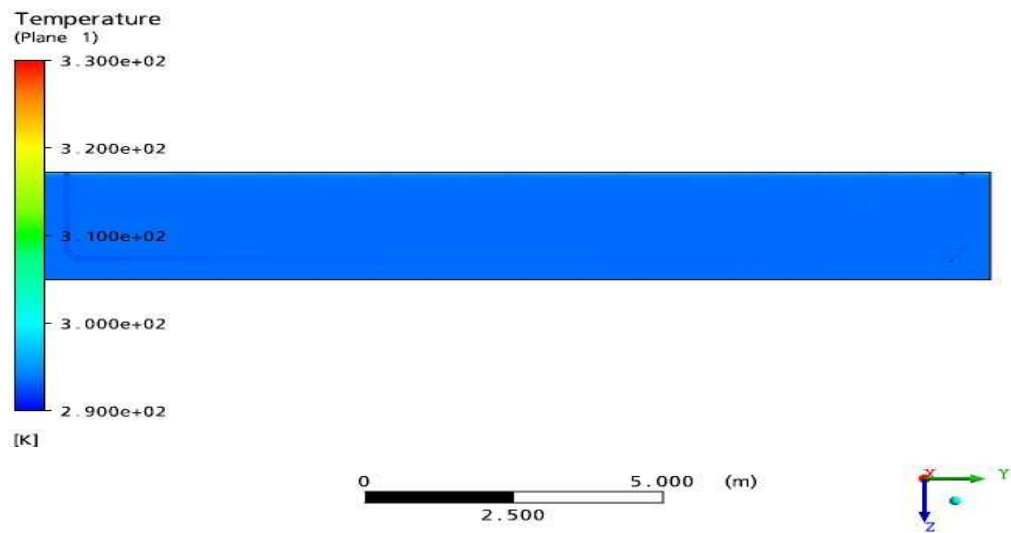
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temp Superficie	Máx Abs	27,9	32,8	39,2	38,8	34,4	33,6	31,2	35,5	35,7	30,8	29	26,6
	Mín Abs	21,32	23,78	28,41	27,9	26,4	26,1	25,1	27,4	27,3	25,5	24,4	22,2
Temp (°C) 5cm	Máx Abs	21,9	23,8	27,7	28,3	26,7	26,5	23,9	26,7	26,8	25,39	29,3	27,5
	Mín Abs	21,1	23,2	24,7	25,1	24,9	23,8	23,8	23,9	23,8	23,3	24,1	21,7
Temp (°C) 10cm	Máx Abs	22,1	23,8	26,2	27,6	25,7	25,95	24,8	25,6	25,8	24,3	26,3	25
	Mín Abs	21,9	23,1	24,2	25,5	24,8	24	23,8	23,8	23,9	23,2	24	22,4
Temp (°C) 20cm	Máx Abs	22,47	23,7	26	27,1	25,2	25,8	24,8	25,4	25,6	24,2	23,7	22,4
	Mín Abs	20,63	23,3	25	25,95	24,9	24,9	23,9	24,1	24,7	23,5	22,9	21,1
Temp (°C) 50cm	Máx Abs	20,26	23,1	24,8	25,1	24,9	24,9	23,9	24,5	24,5	23,3	22,95	21
	Mín Abs	19,42	21,6	24,2	25	24,4	24,5	23,6	24	24,2	23,2	22,2	19,8
Viento	Vel Media	2,4	2,4	2,5	2,2	2,1	2,7	2,2	1,9	1,9	1,9	1,9	2,1
	m/s												
	Direc.	NW/SSE	SE/NW	NW/SE	SE/NW	ESE/SE	ESE/SE	SSE/SSE	SSE/SE	SSE/NW	SSE/NW	SSE/SE	SSE/SE

APENDICE C

Resultados modelo 102mm (4pulg), 15 m para diferentes horas.

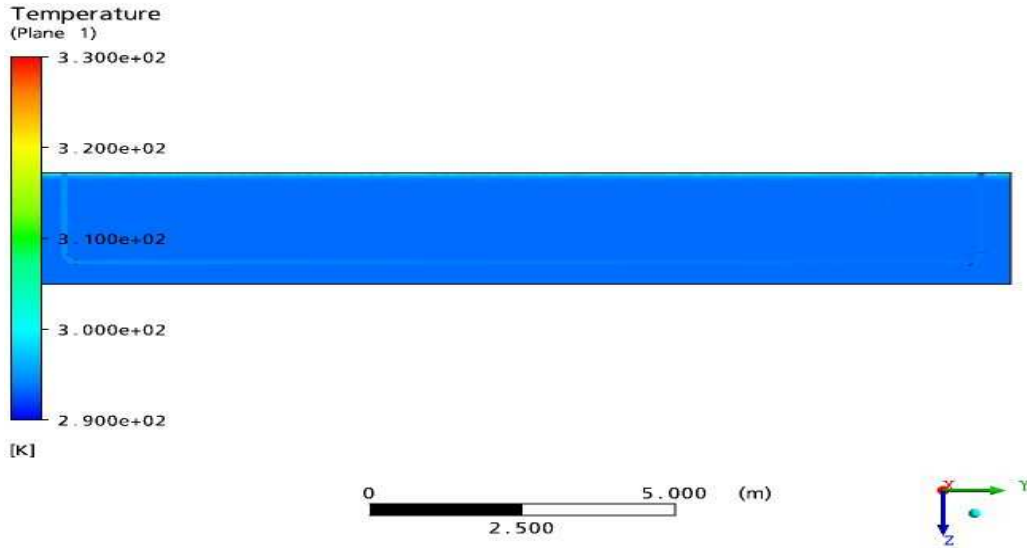


8 a.m.

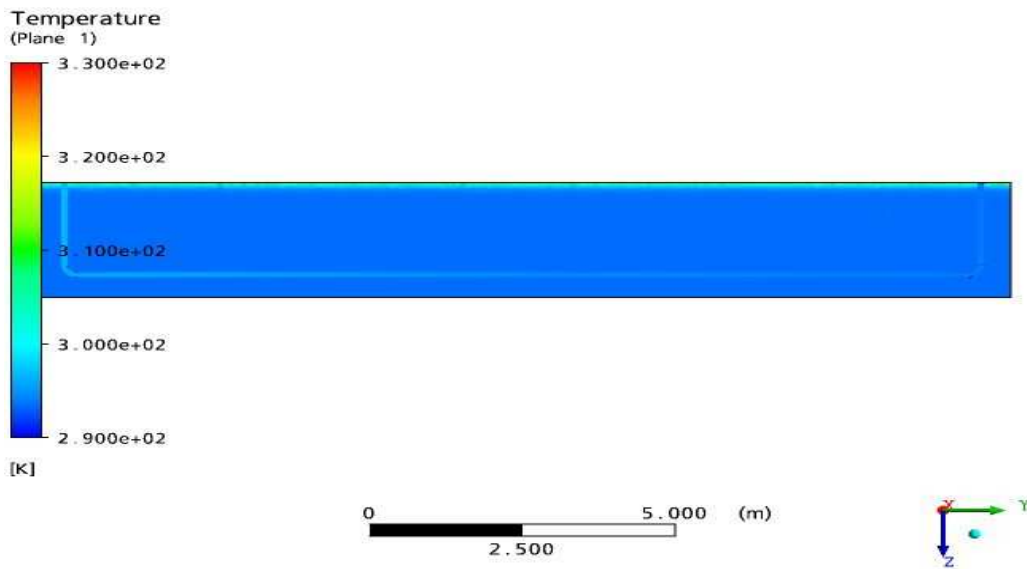


9 a.m.

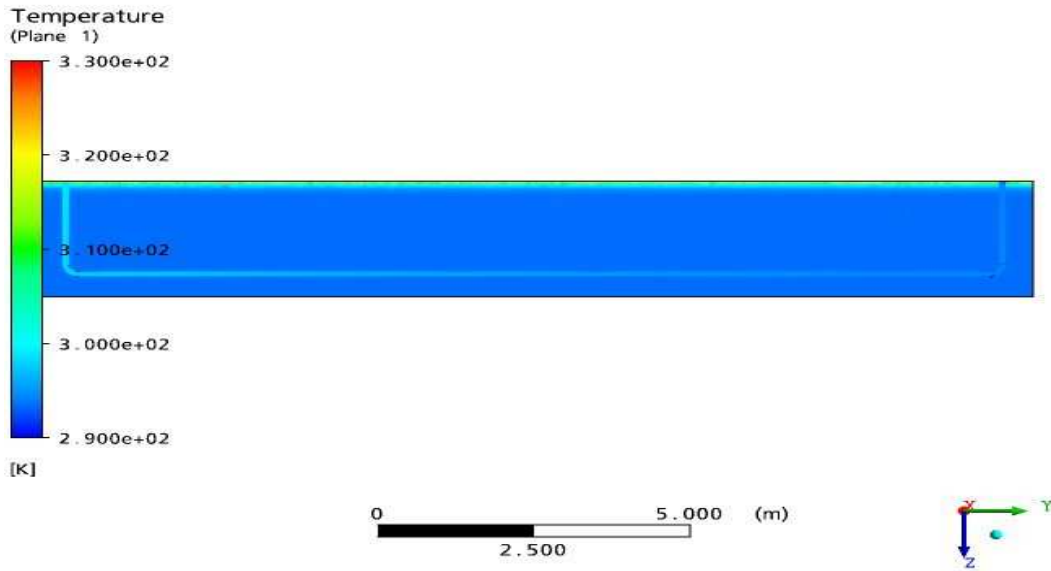




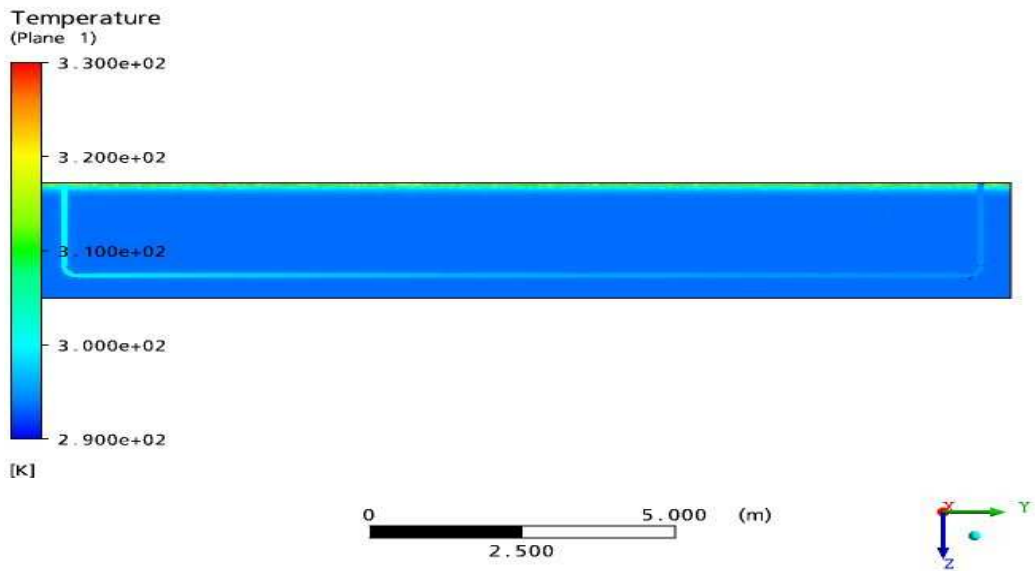
10 a.m.



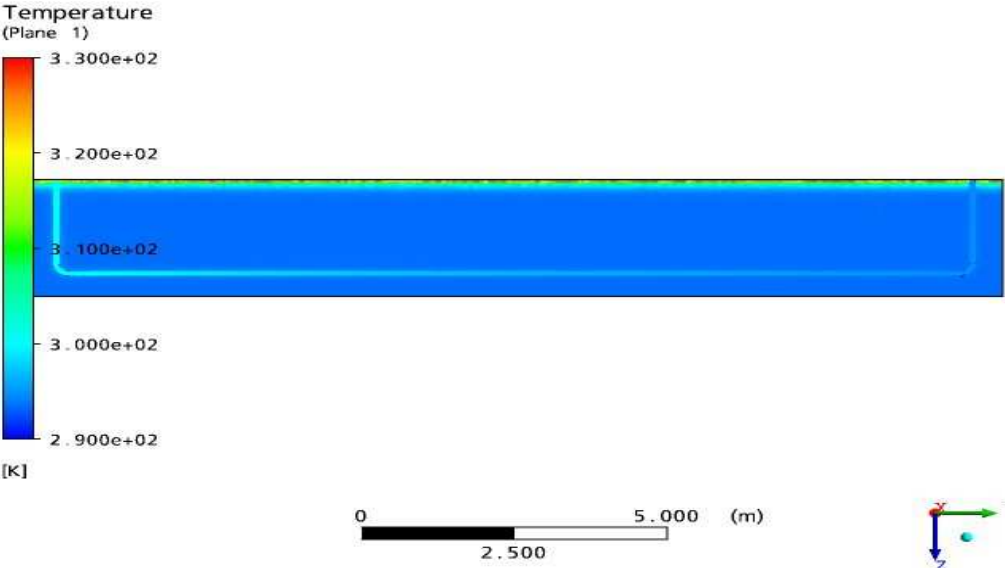
11 a.m.



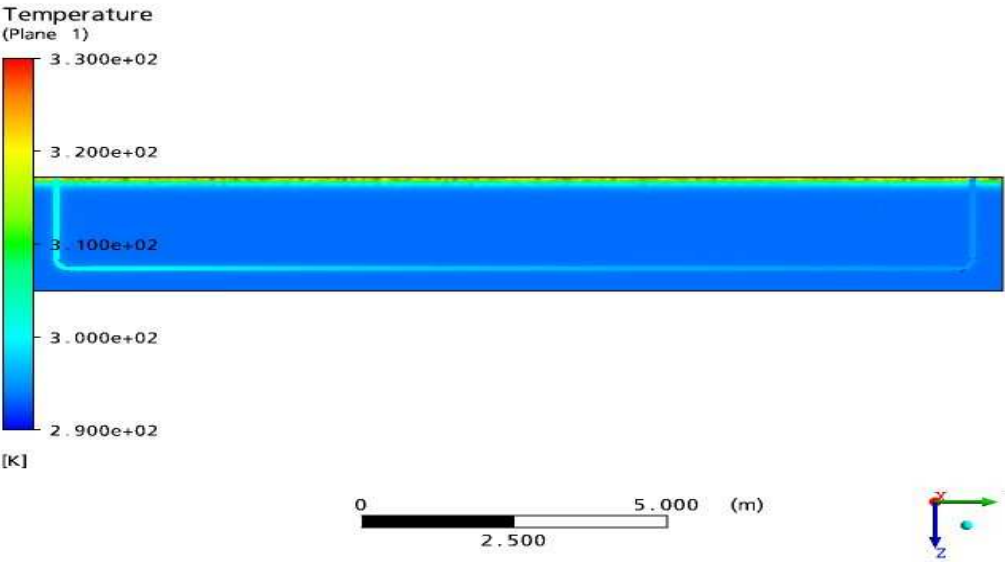
12 p.m.



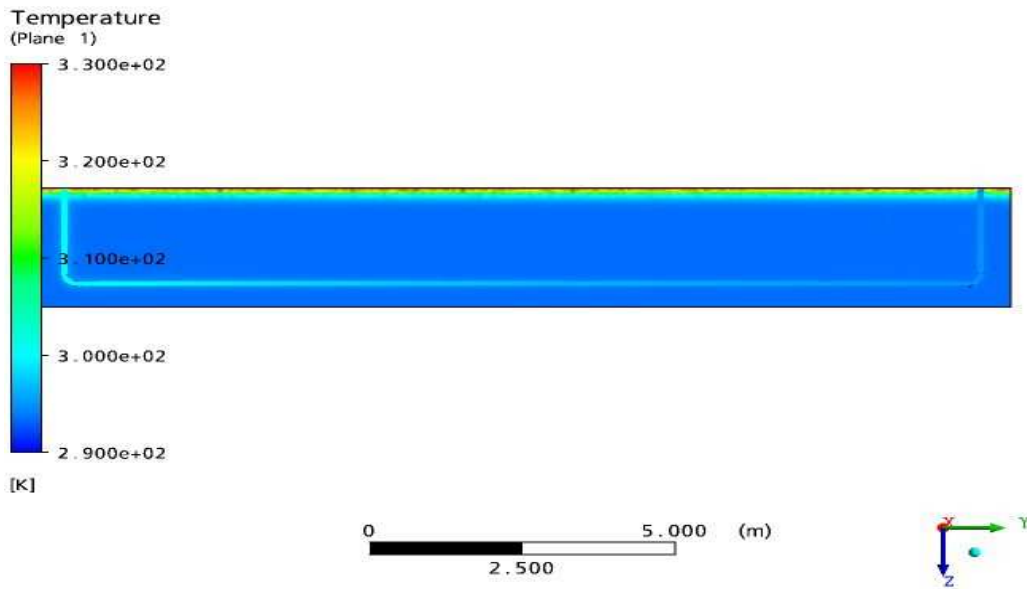
1 p.m.



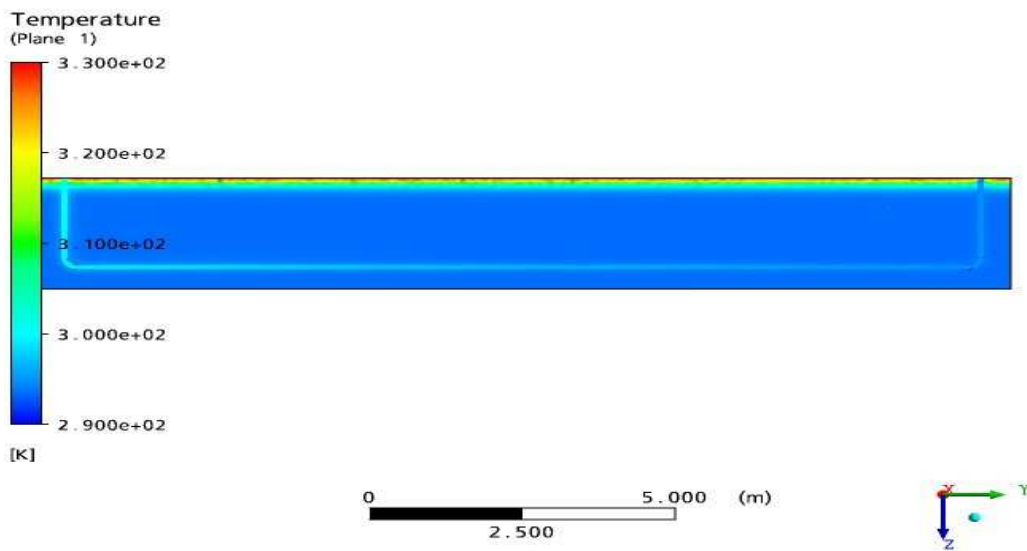
2 p.m.



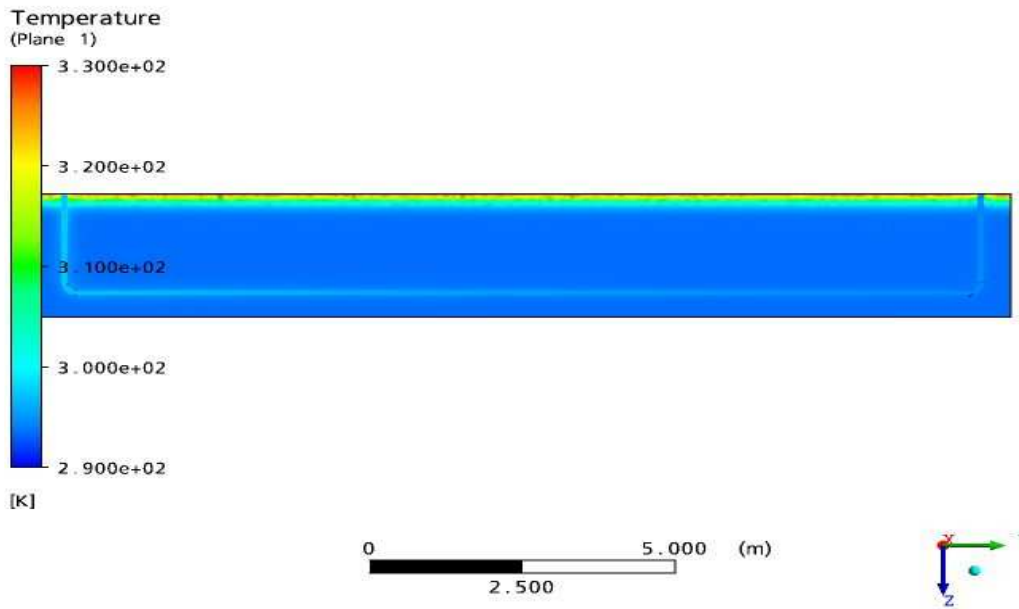
3 p.m.



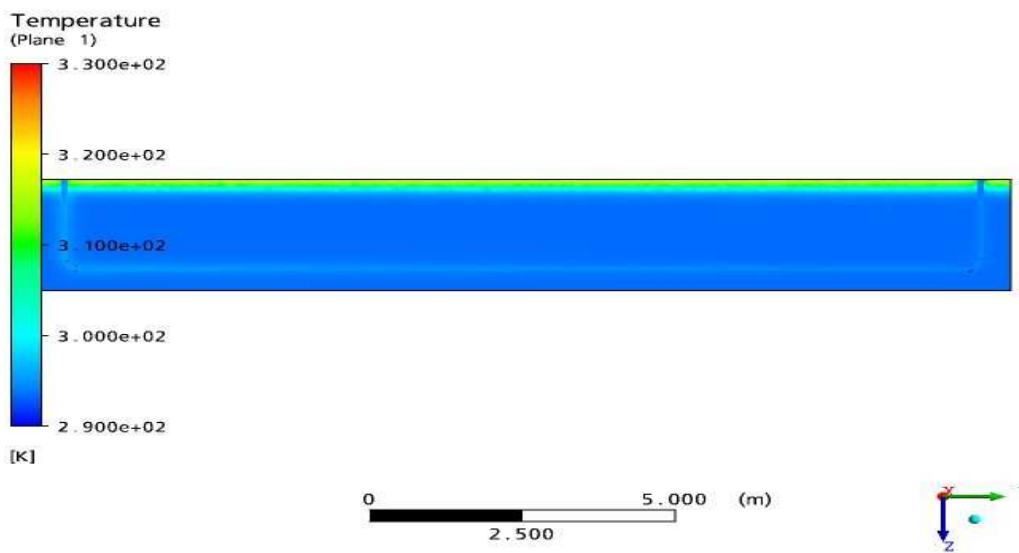
4 p.m.



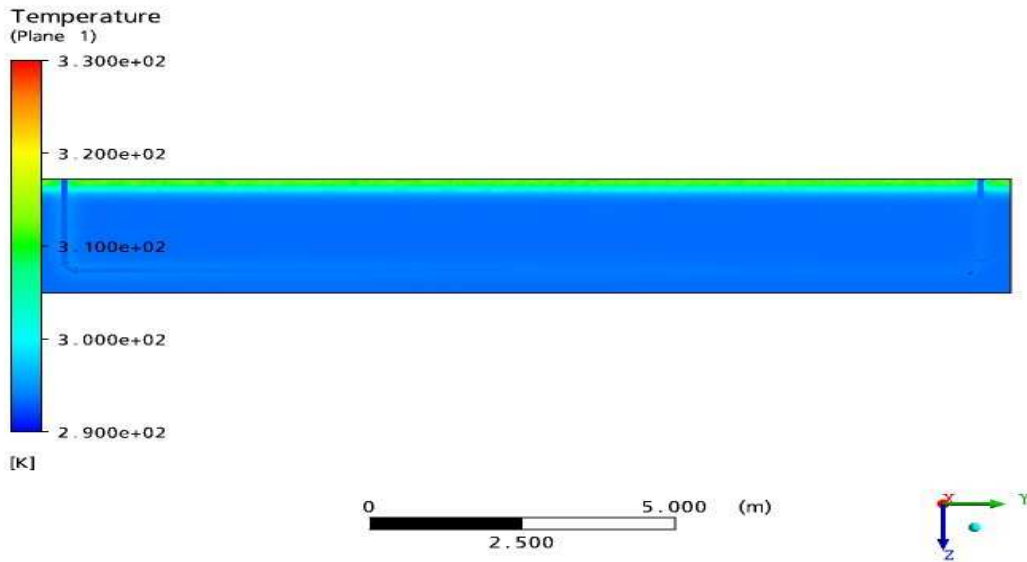
5 p.m.



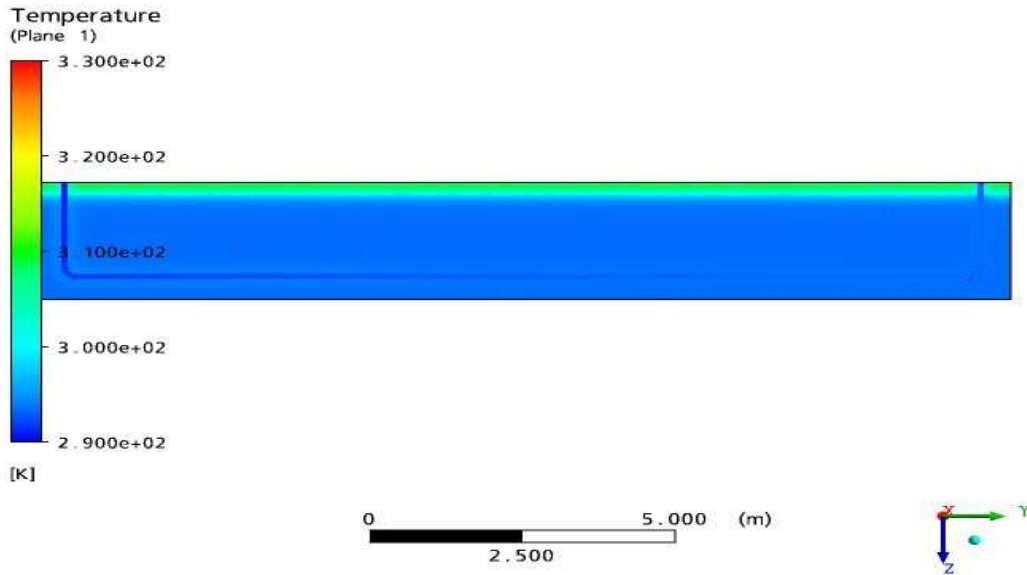
6 p.m.



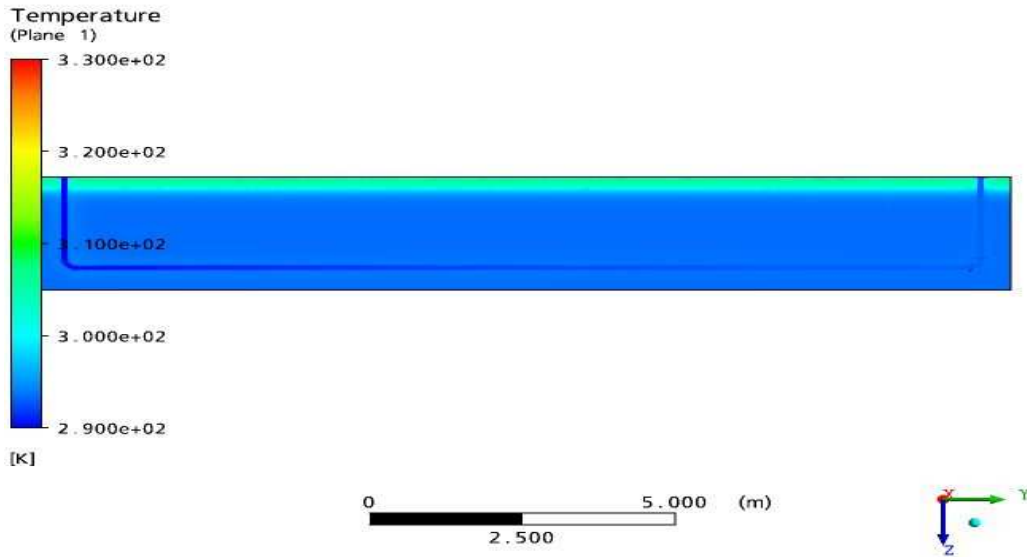
7 p.m.



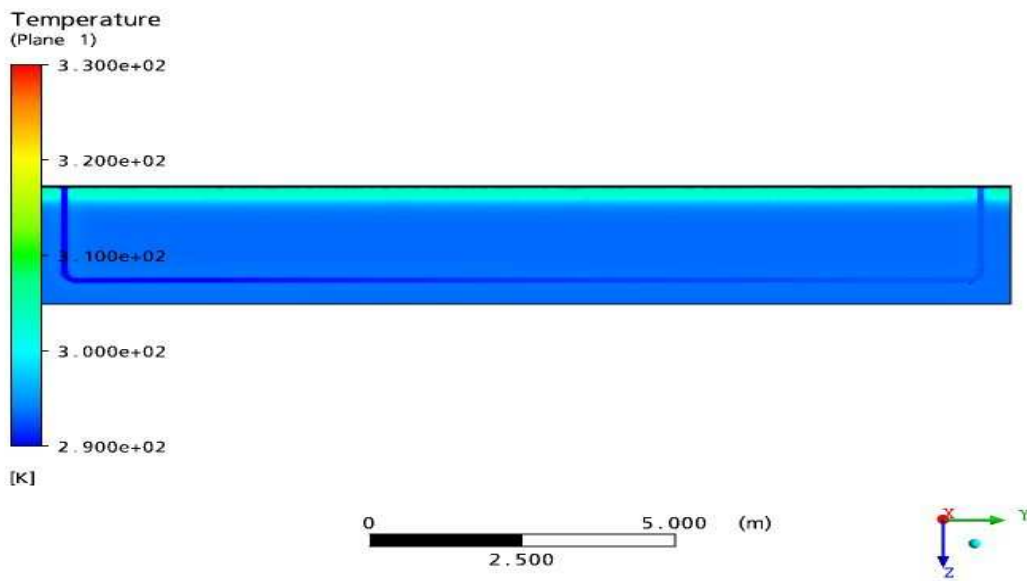
8 p.m.



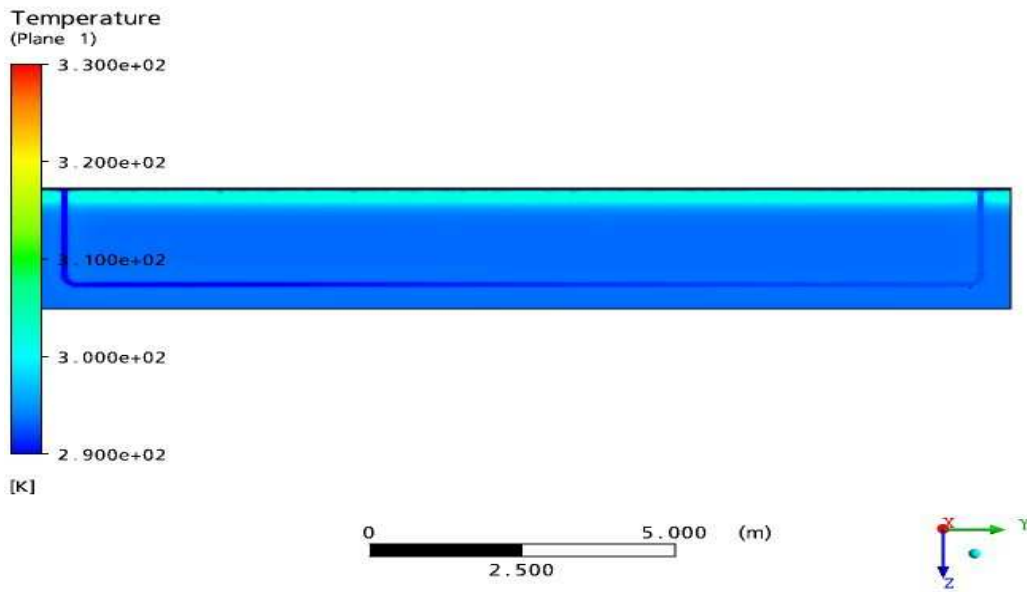
9 p.m.



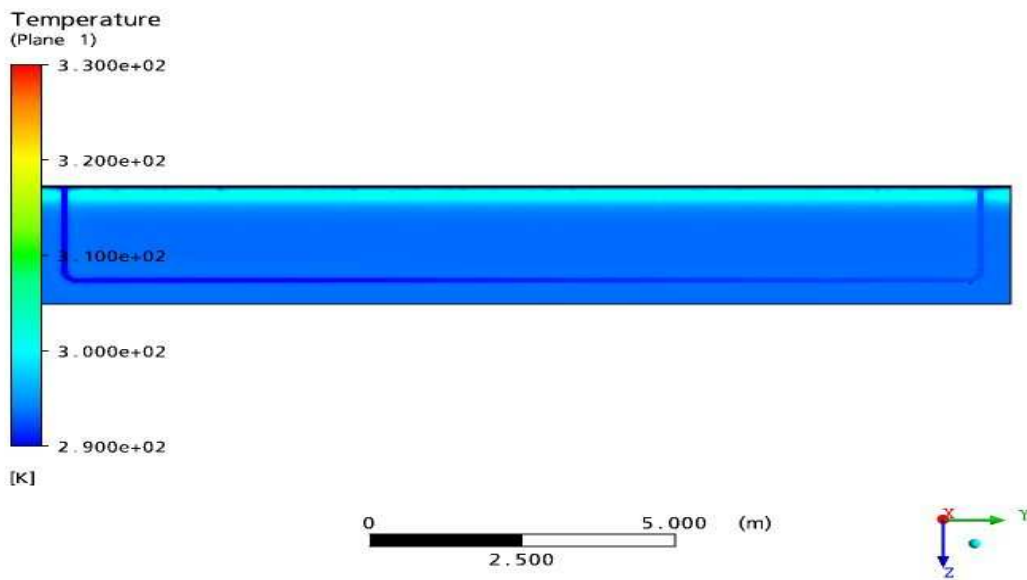
10 p.m.



11 p.m.

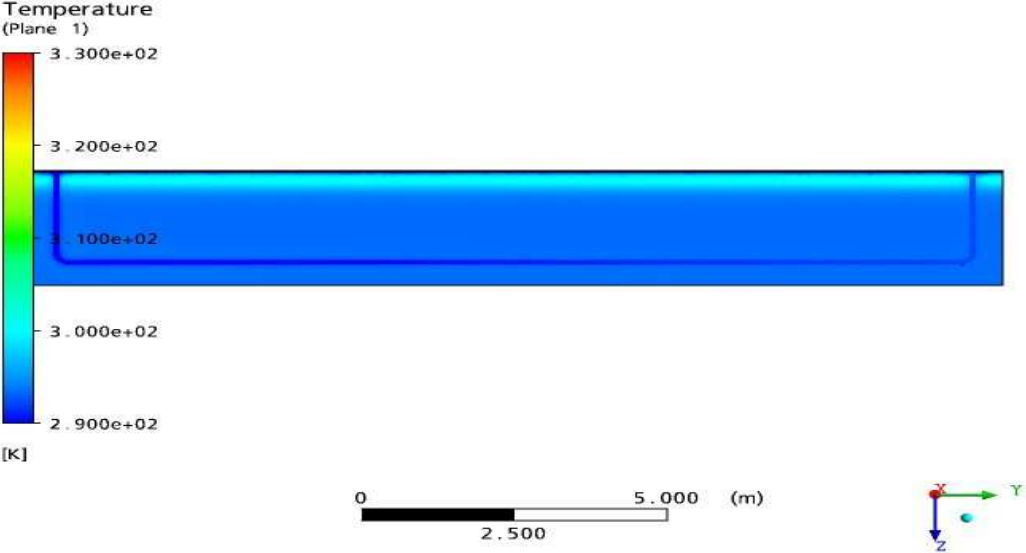


12 a.m.

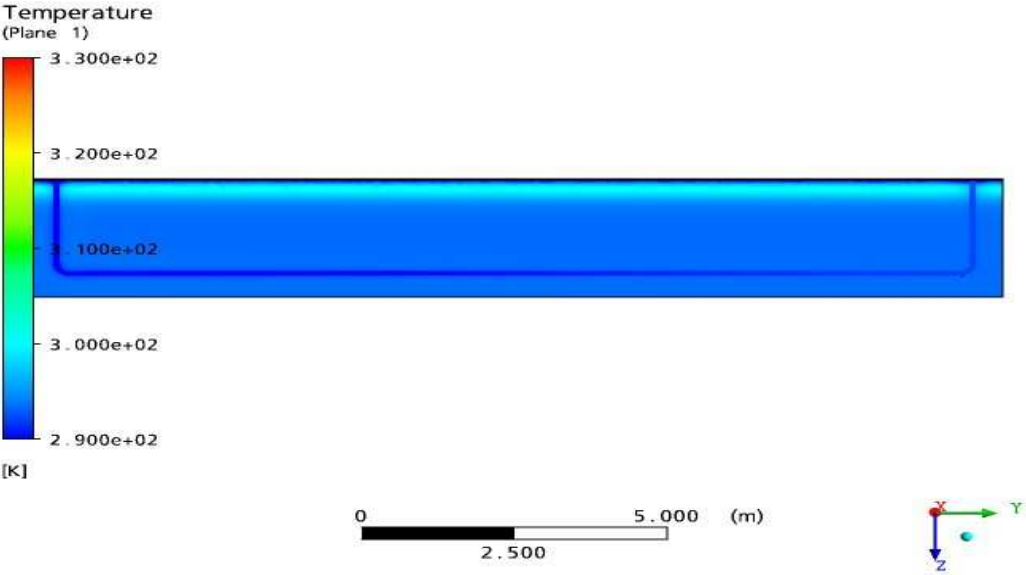


1 a.m.

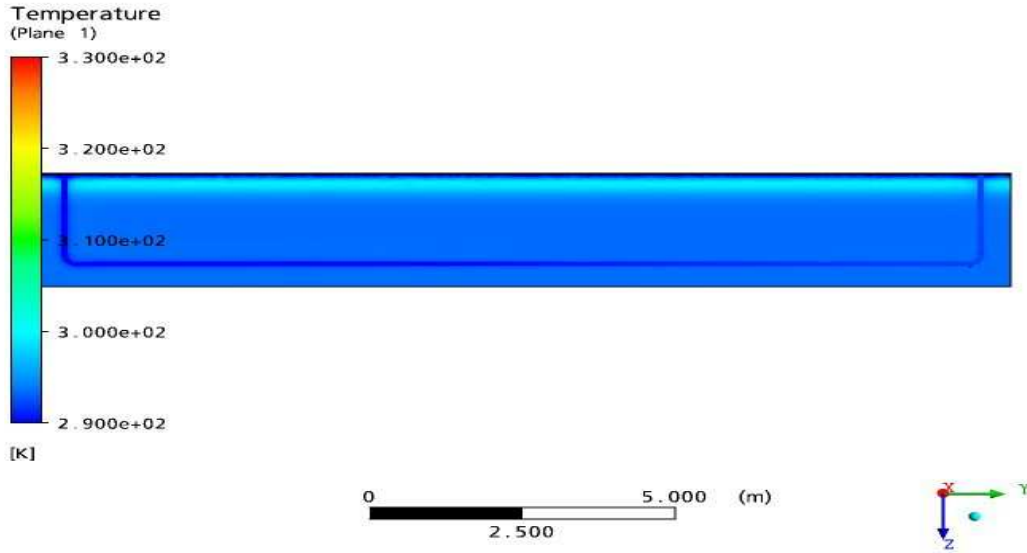




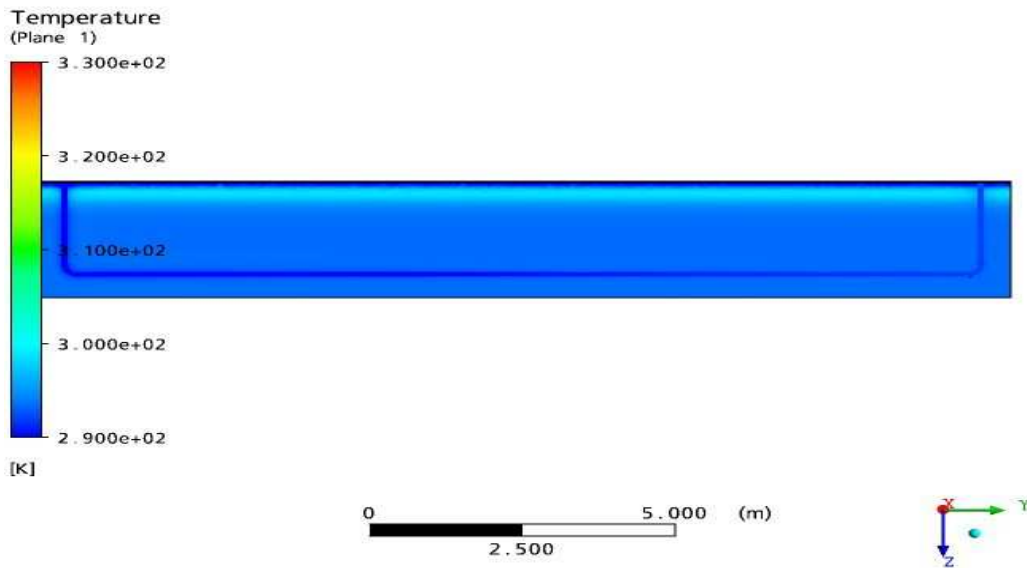
2 a.m.



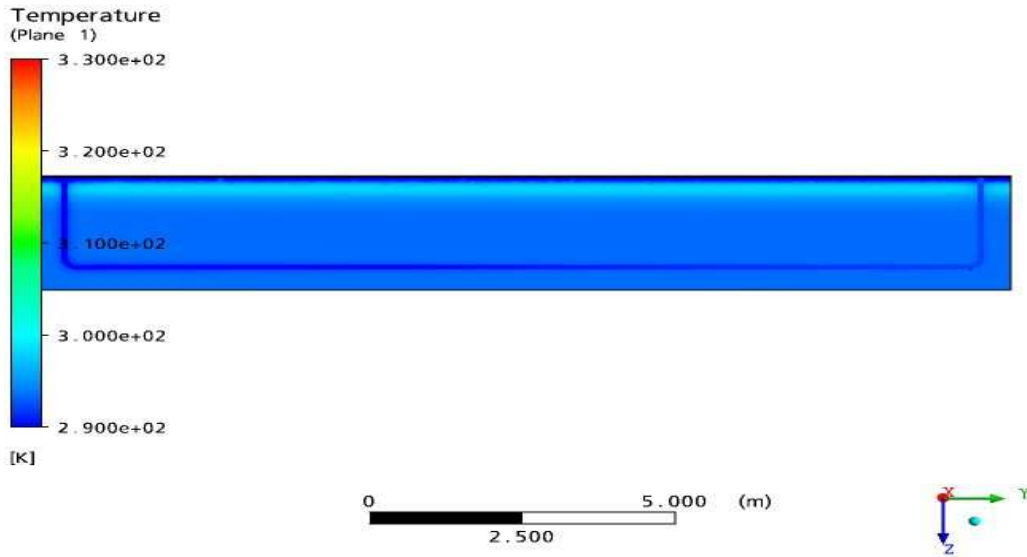
3 a.m.



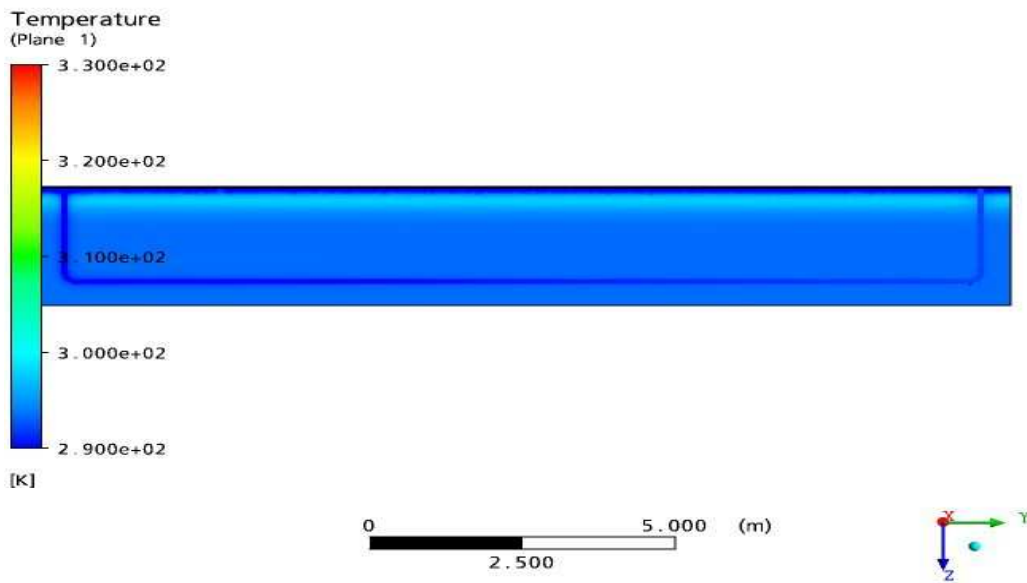
4 a.m.



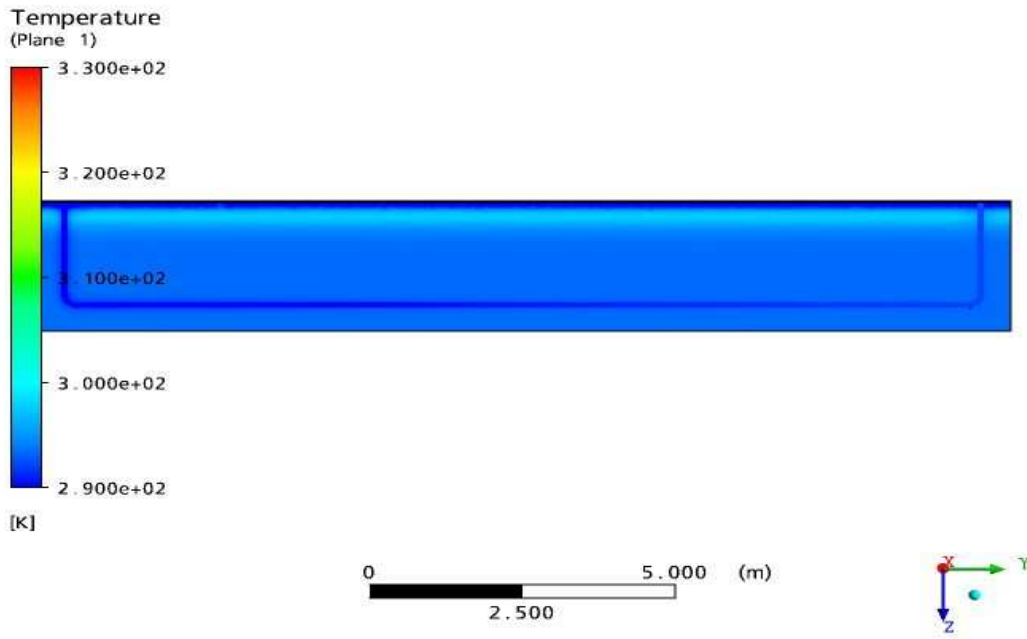
5 a.m.



6 a.m.



7 a.m.



8 a.m.

