

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL
SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DEL
LABORATORIO DE ENERGÍAS NO CONVENCIONALES DEL
DECEN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

CARLOS GEOVANNY VINUEZA ALULEMA

DIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA

CODIRECTOR: ING. ROBERTO GUTIÉRREZ

Sangolquí, 2008-08-18

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “Simulación del comportamiento térmico del sistema de combustión de biomasa residual del laboratorio de energías no convencionales del DECEM” fue realizado en su totalidad por Carlos Geovanny Vinueza Alulema, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Guasumba.

DIRECTOR

Ing. Roberto Gutiérrez.

CODIRECTOR

Sangolquí, 04 de agosto de 2008

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DEL LABORATORIO DE ENERGÍAS NO CONVENCIONALES DEL DECEM”

ELABORADO POR:

Carlos Geovanny Vinueza Alulema

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Crnl.(sp)

Ing. Juan Díaz

Director

Sangolquí, 18 de Agosto de 2008

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres, quienes con gran esfuerzo me apoyaron durante toda mi formación académica.

Carlos Vinueza A.

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a Dios por permitirme concluir ésta etapa de mi vida, a mi familia y a todo el personal de la ESPE que de una u otra manera contribuyeron a mi formación en la carrera de Ingeniería Mecánica y a la realización de este proyecto.

Carlos Vinueza A.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
INTRODUCCIÓN	xviii
CAPÍTULO 1	
GENERALIDADES	
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Situación local	4
1.1.2. Situación regional	5
1.1.3. Situación mundial	6
1.2. Definición del problema	8
1.3. Objetivos	9
1.3.1. General	9
1.3.2. Específicos	9
1.4. Alcance del proyecto	9
1.5. Justificación e importancia	9
1.5.1. Posible solución	10

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Definiciones	11
2.2. Método de análisis por elementos finitos	12
2.3. Dinámica de Fluidos Computacional	13
2.3.1. Ecuaciones de Navier-Stokes	14
2.4. Descripción del sistema de combustión de biomasa residual	17

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL

3.1. Modelamiento tridimensional del sistema	20
3.2. Definición del escenario a simular	26
3.3. Alternativas de simulación y desarrollo de la simulación	27
3.3.1. Condiciones generales del escenario.	27
3.3.2. Condición de simetría	32
3.3.3. Condiciones iniciales de los fluidos	32
3.3.4. Condiciones de frontera de los fluidos	34
3.3.5. Especificación de materiales	36
3.3.6. Parámetros de control en la solución de la simulación	38
3.3.7. Parámetros de la malla	39
3.3.8. Inicio de la simulación	42

3.3.9. Ajustes a la simulación – Geometría y malla modificada	44
3.3.10. Corrida de la simulación.	51
3.4. Presentación y análisis de resultados	52
3.4.1. Temperatura del aire	52
3.4.2. Velocidad del aire	53
3.4.3. Trayectoria del flujo de aire	54
CAPITULO 4	
GUÍA DEL USUARIO DE LA SIMULACIÓN	
4.1. Procedimiento de definición de la simulación	57
4.1.1. Modelamiento tridimensional del sistema.	57
4.1.2. Definición del escenario a simular	58
4.1.3. Condición de simetría.	61
4.1.4. Condiciones iniciales de los fluidos	63
4.1.5. Condiciones de frontera de los fluidos	66
4.1.6. Especificación de materiales	70
4.1.7. Parámetros de control en la solución de la simulación	72
4.1.8. Parámetros de malla	74
4.1.9. Inicio de la simulación	75
4.1.10. Ajustes a la simulación – geometría y malla modificada	79
4.1.11. Corrida de la simulación	81

4.2. Procedimiento de desarrollo, control y presentación de resultados	83
--	----

CAPITULO 5

ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

5.1. Análisis económico	88
-------------------------	----

5.1.1. Consideraciones.	88
-------------------------	----

5.1.2. Resumen presupuestario	89
-------------------------------	----

5.1.3. Ingresos y egresos referenciales.	89
--	----

5.2. Análisis financiero	91
--------------------------	----

5.2.1. Consideraciones.	91
-------------------------	----

5.2.2. Cálculo de índices de rentabilidad TIR y VAN	91
---	----

5.2.3. Fuentes de financiamiento	92
----------------------------------	----

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones	93
-------------------	----

6.2. Recomendaciones	94
----------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	95
--------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Orden	Contenido	Pág.
2.1	Características generales del equipo.	19
5.1	Resumen presupuestario	89
5.2	Precio de venta al público de la simulación	90
5.3	Proyección de ingresos anual.	90
5.4	Proyección de egresos anual.	90
5.5	Proyección de flujo de caja	91
5.6	Remen de datos requeridos para los índices.	91
5.7	Valor de los índices de TIR y VAN	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Orden	Contenido	Pág.
1.1	Participación de la energía renovable en el consumo final global de energía del año 2006.	6
1.2	Horno quemador de biomasa de la empresa Super Brix	8
2.1	Mallado de una geometría	13
2.2	Principio de funcionamiento de sistema	17
2.3	Esquema del sistema de combustión de biomasa	18
2.4	Fotografía del sistema de combustión de biomasa	19
3.1	Vista isométrica- parte posterior del modelo detallado	21
3.2	Vista isométrica – parte frontal del modelo	21
3.3	Vista isométrica frontal en corte longitudinal del modelo	22
3.4	Vista isométrica frontal en corte transversal del modelo	22
3.5	Vista isométrica del modelo simplificado	23
3.6	Vista isométrica en corte del modelo.	24
3.7	Vista frontal del sistema	24
3.8	Vista de Sección A-A y Detalle B	25
3.9	Vista superior del sistema	25
3.10	Modelo CAD del sistema de combustión de biomasa residual	27
3.11	Creación del proyecto “Sim01”	28
3.12	Definición del sistema de unidades principal	28

Orden	Contenido	Pág.
3.13	Selección del tipo de análisis y sus características	29
3.14	Detalle de fluidos y sus características	29
3.15	Selección del material de todos los componentes sólidos	30
3.16	Condiciones de las paredes del sistema.	30
3.17	Condiciones iniciales del sistema.	31
3.18	Resolución de la geometría y de los resultados del estudio.	31
3.19	Plano de simetría del sistema	32
3.20	Condiciones iniciales del aire caliente	
3.21	Condiciones iniciales del aire frío	33
3.22	Condición de frontera del aire frío que ingresa al sistema	34
3.23	Condición de frontera del aire caliente que ingresa al sistema	35
3.24	Condición de frontera del aire frío y caliente que salen del sistema	36
3.25	El material de los tubos y el bastidor	37
3.26	El material de las tapas	37
3.27	Definición de parámetro de control a la temperatura del aire	38
3.28	Definición de parámetro de control a la velocidad del aire	39
3.29	Optimización de la resolución de la malla en paredes delgadas	40
3.30	Verificación de malla inicial del sistema sobre el modelo cad.	40

Orden	Contenido	Pág.
3.31	Vista general de la malla inicial sobre el modelo cad del sistema	41
3.32	Creación de la malla final usada en el cálculo.	42
3.33	Malla final del sistema	42
3.34	Mallado final de los tubos del intercambiador de calor.	43
3.35	Modelo CAD tridimensional modificado	44
3.36	Detalles de modelo CAD tridimensional modificado	45
3.37	Vista isométrica de la malla inicial del sistema modificado.	46
3.38	Vista frontal de la malla inicial del sistema ajustado.	47
3.39	Celdas en la malla inicial de los tubos del sistema modificado	47
3.40	Vista frontal de la malla final del sistema modificada.	48
3.41	Segmentos rectos y curvos de la malla final ajustada.	49
3.42	Vista detallada de la malla final del sistema modificado.	49
3.43	Vista ampliada completa de la zona y de las celdas de la malla final del sistema modificado.	50
3.44	Pantalla de Cosmos FloWorks durante el cálculo de la simulación	52
3.45	Resultados de la simulación – Temperatura del aire	53
3.46	Resultados de la simulación – Velocidad del aire	54
3.47	Resultados de la simulación – Trayectoria del aire	55
4.1	Geometría inicial desarrollada para la simulación	57

Orden	Contenido	Pág.
4.2	Geometría modificada para la simulación	58
4.3	Ventana de activación de cosmosfloworks	59
4.4	Menús de Cosmosfloworks en el área de trabajo de solidworks	59
4.5	Ubicación de asistente de configuración de proyectos	60
4.6	Pantalla inicial del asistente de definición del escenario	60
4.7	Plano de simetría del sistema	61
4.8	Dominio computacional de la simulación	62
4.9	Dominio computacional de la simulación – coordenadas	62
4.10	Dominio computacional de la simulación-dirección de simetría	63
4.11	Ingreso de condiciones iniciales de fluidos en la simulación	64
4.12	Definición de condición inicial de aire frío del sistema	65
4.13	Definición de condiciones iniciales del aire caliente.	65
4.14	Registro de condiciones iniciales de los fluidos.	66
4.15	Ingreso de las condiciones de frontera en la simulación	67
4.16	Definición de condición de frontera del ingreso del aire frío.	68
4.17	Definición de condición de frontera del ingreso del aire caliente	69
4.18	Definición de condición de frontera de la salida del aire.	70
4.19	Definición del material del sistema.	70
4.20	Definición del material de los componentes del sistema.	71

4.21	Definición del material de los escapes y admisiones	71
4.22	Especificación de los objetivos de la simulación.	72
4.23	Selección de los objetivos de la simulación.	73
4.24	Visualización de los objetivos de la simulación.	73
4.25	Acceso a los parámetros de la malla	74
4.26	Activación de opción de paredes delgadas en la malla inicial	74
4.27	Escenario definido para la simulación.	75
4.28	Acceso al cálculo de la malla.	75
4.29	Ejecución del cálculo de la malla.	76
4.30	Ejecución del cálculo de la malla.	76
4.31	Ejecución del comando - Cargar de resultados.	77
4.32	Ejecución del comando-Selección de tipo de resultados a cargar.	77
4.33	Ejecución del comando – Visualización de la malla en 3D.	78
4.34	Opciones de visualización de la malla.	78
4.35	Visualización de la malla del sistema.	79
4.36	Geometría del sistema: a) Inicial, b) Final.	80
4.37	Configuración de parámetros de la malla inicial.	80
4.38	Geometría y malla: a) Inicial, b) Final	81
4.39	Acceso al cálculo de la simulación.	81

Orden	Contenido	Pág.
4.40	Ejecución del cálculo de la simulación	82
4.41	Pantalla del “Solver” de Cosmos FloWorks	82
4.42	Carga de resultados. (a) Comando (b) Selección del archivo”.fld”	83
4.43	Cortes para presentación de resultados (a) comando (b) opciones	84
4.44	Menú de opciones de los parámetros de visualización de resultados	85
4.45	Ejemplo de la visualización de resultados de la velocidad del aire	85
4.46	Desplazamiento del aire en el sistema (a) comando (b) opciones	86
4.47	Ejemplo de la visualización de las trayectorias del aire.	87

ANEXOS

Anexo 1 – Guía de práctica de laboratorio	96
Anexo 2 – Resultados complementarios de la simulación	99

INTRODUCCIÓN

El uso de biomasa, recursos biológicos, como combustible energético ha sido utilizado de manera importante desde hace mucho tiempo atrás por el hombre para obtener calor, secar cosas o cocinar alimentos a través de la combustión artesanal de la biomasa. En la actualidad se han clasificado varios métodos utilizados para convertir la biomasa en energía, el primer método es el termoquímico, por combustión, y el segundo es el biológico, por fermentación, se emplean estos métodos para obtener energía térmica (gas, aire o agua caliente) y energía eléctrica.

Las simulaciones computarizadas dan un significativo soporte en áreas como la medicina, mecánica, electrónica, biología para obtener información y un mejor entendimiento del comportamiento de un fenómeno físico bajo condiciones establecidas o impuestas; si bien las simulaciones computarizadas son relativamente recientes éstas se basan en técnicas matemáticas tradicionales que ahora pueden ser puestas en practica gracias a ordenadores de gran capacidad de memoria y velocidad.

El disponer de una simulación computarizada del comportamiento térmico del los dos flujos de aire que intervienen en el intercambiador de calor del sistema de combustión de biomasa residual del equipo perteneciente al laboratorio de energías no renovables del DECEM es el objetivo principal del presente

trabajo, y para el cual en primera instancia se definió las condiciones de entorno del sistema, escenario, a considerar en la simulación; como segundo punto se desarrollo un modelo computarizado tridimensional del sistema y al finalizar estas etapas se procedió a desplegar la información de los resultados del cálculo de la simulación computarizada; además se detallo como se elaboró la simulación paso a paso en el programa CosmosFloWorks.

Conseguir un proceso de mejoramiento continuo del sistema de generación de energía térmica basado la combustión de biomasa residual demanda de inversiones de tiempo y dinero, al disponer de una simulación computarizada del sistema se consigue tener una importante reducción en el tiempo y costos requeridos para obtener información y un correcto entendimiento sobre el comportamiento que tienen los fluidos que actúan en el intercambiador de calor del sistema y de esta manera se puede identificar oportunidades de mejora que conlleven a incrementar la eficiencia global del sistema evitando los costos incurridos en pruebas de campo costosas y que pueden resultar insatisfactorias en algunos casos.

Los recursos utilizados para la elaboración de este proyecto fundamentalmente son dos, el primero es el tiempo requerido para la investigación y comprensión del fenómeno físico que gobierna el sistema y en segundo lugar el disponer de recursos computacionales que se requirió para desarrollar el cálculo de la simulación; una vez que se acoplo estos dos recursos los resultados de la simulación pudieron ser obtenidos y de esa manera el laboratorio de energías no renovables del DECEM cuenta con una simulación computarizada de éste sistema.

Adicionalmente este proyecto permite tener información visual que puede ser usada para marketing y para mostrar la tecnología involucrada en el sistema; por ende se facilita el proceso de evidenciar los esfuerzos investigativos y económicos que se están realizando en el tema de las energías no convencionales en el DECEM hacia la comunidad académica, industrias relacionadas y publico en general.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La biomasa es el combustible energético que se obtiene de manera directa o indirecta de los recursos biológicos, la energía de biomasa proviene de la madera, residuos agrícolas, cáscaras y estiércol de animal por tanto es renovable indefinidamente.

El hombre desde hace mucho tiempo ha sabido beneficiarse del valor energético de la biomasa quemándola para calentarse, secar cosas o cocinar alimentos. La biomasa junto con la energía directa del sol y la fuerza muscular han sido las principales fuentes de energía utilizadas por la humanidad durante largos períodos de tiempo.

La cascarilla de arroz esta constituida por celulosa y sílice, es de consistencia quebradiza y abrasiva, por su forma cóncavo, consistencia frágil y peso liviano es fácilmente volátil por lo cual al apilarse ocupa grandes espacios, su peso

específico está alrededor de 150 [Kg/m³], con un contenido de humedad de 30% su poder calórico es de 13180 [Kj/Kg].

Existen dos métodos de conversión de la biomasa en energía, el método termoquímico y el método biológico; se emplean éstos métodos para obtener energía térmica (aire caliente, agua caliente, gases calientes o vapor de agua) y energía eléctrica.

El método termoquímico se basa en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa y los materiales más idóneos para su conversión son los de bajo contenido en humedad y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, bagazo, residuos agrícolas y cáscaras; en general existen tres categorías: la combustión, la gasificación y la pirolisis

La combustión es la oxidación completa de la biomasa por el oxígeno del aire y como tecnología existente de esta categoría se tiene calderas pirotubulares, calderas acuotubulares, calderas de lecho fluidizado burbujeante y circulante, quemadores de pilas, quemadores de ciclón, quemadores de astillas, quemadores de briquetas, estufas domésticas, hornos de ladrillos cerámicos y hornos alfareros; su aplicación es la calefacción doméstica y la producción de calor industrial.

La gasificación es la oxidación parcial de la biomasa en presencia de cantidades limitadas de aire y como tecnología existente de esta categoría se tiene gasificador de tiro invertido, gasificador para camiones, gasificador de lecho fluidizado y gasificador de corriente descendente; su aplicación es la calefacción doméstica, la producción de calor industrial y la generación de electricidad.

La pirolisis es la oxidación parcial y controlada de la biomasa en ausencia de oxígeno como tecnología existente de esta categoría se tiene sistema de Torrax, sistema de Landgar y sistema de hidrógeno; su aplicación es la producción de carbón vegetal.

El método biológico se basa en la fermentación y existe dos categorías. La fermentación alcohólica que es una técnica usada desde hace mucho en los azucareros así como la destilación que permite obtener alcohol etílico y la fermentación metánica que es la digestión anaerobia de la biomasa por bacterias para generar un gas que contiene alrededor de 60 % de metano y 40 % de gas carbónico. El uso de éste método apunta a la producción de energía térmica y producción de electricidad.

Por otro lado es conveniente enunciar que las simulaciones computarizadas están dando un excelente soporte en la investigación y obtención de tecnología de punta en áreas como la electricidad, medicina, mecánica, electrónica, biología y demás ciencias.

Puede entenderse como simulación computarizada al uso del computador para la reproducción aproximada y el estudio de un fenómeno (físico, químico, biológico, económico, psicológico, entre otros); siendo su principal objetivo obtener mayor información y entendimiento acerca de la respuesta y evolución de un fenómeno bajo varias condiciones impuestas.

Pese a que las herramientas de simulación por computador tienen una historia relativamente reciente, se basan en técnicas matemáticas desarrolladas tiempo atrás y que sólo pudieron ser puestas en práctica gracias a la aparición de máquinas con gran capacidad de memoria y elevada velocidad de procesamiento. Dicho en otra forma, el computador resuelve una serie de ecuaciones conocidas que se utilizan para calcular las variables que describen los fenómenos involucrados.

Para la resolución de estas ecuaciones conocidas mediante el uso del computador se utilizan métodos numéricos como el de los elementos finitos, elementos de frontera, diferencias finitas y volúmenes finitos.

El resolver un problema de mecánica de fluidos mediante aproximaciones matemáticas con la ayuda del ordenador constituye la base de los denominados CFD, por sus siglas en inglés, cuya traducción es Dinámica de Fluidos Computacional.

En el campo de la Dinámica de Fluidos Computacional las ecuaciones empleadas para la solución de problemas fueron descubiertas hace más de 150 años por el ingeniero francés Claude Navier y el matemático irlandés George Stokes; son las ecuaciones de Navier-Stokes, así denominadas en su honor, que se derivan directamente de las leyes del movimiento de Newton.

1.1.1. Situación local

El Sistema de combustión de biomasa residual, en adelante llamado únicamente sistema, está instalado en los predios asignados a la carrera de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica del Ejército y el gestor del proyecto, el profesor e investigador Ing. José Guasumba, ha impulsando acciones para analizar y mejorar continuamente los componentes del sistema, una de estas acciones es el realizar una simulación computarizada del intercambiador de calor que es uno de los componentes a fin de incrementar el conocimiento sobre el comportamiento de los flujos de aire que intervienen durante la operación del sistema.

El sistema tiene por objetivo proporcionar energía térmica, aire caliente, a temperaturas adecuadas para la calefacción de ambientes o secado de alimentos y cualesquier otra aplicación industrial que requiera de éste tipo de energía, teniendo como suministro de calor la combustión directa de biomasa residual.

Se ha utilizado el sistema para realizar ensayos de laboratorio y demostraciones sobre el secado controlado de granos y frutas teniendo como suministro de calor la combustión de la cascarilla de arroz.

A pesar de que la industrial local es bastante diversa, en variedad de productos y procesos industriales, el uso de estos sistemas no ha tenido ninguna acogida y por tanto ningún tipo de desarrollo tecnológico, esto se da principalmente por el fácil y poco controlado acceso de las industrias a combustibles subsidiados por el gobierno, como es el caso del gas de uso domestico, por eso éste combustible subsidiado es usado frecuentemente para obtener energía térmica.

La tecnología en la cual se basa éste sistema es académicamente tratada de manera habitual en la malla curricular de las carreras de formación de ingeniería mecánica de las politécnicas situadas en la ciudad de Quito, siendo parte de la transferencia de calor y el diseño de sistemas termodinámicos. Por otra parte en estas politécnicas las simulaciones computarizadas están siendo utilizadas de manera poco frecuente en la elaboración de proyectos de grado de las facultades de ingeniería mecánica, esto debido a la falta de conocimiento que tienen los estudiantes sobre el manejo de ésta herramienta que está destinada a dar soporte a la ingeniería.

1.1.2. Situación regional

Los sistemas de combustión de biomasa residual no son equipos que están disponibles comercialmente en el Ecuador, en su mayoría la quema de biomasa residual es hecha de un modo artesanal para la cocción de alimentos y la calefacción domestica; los ingenios azucareros son la única industria que quema biomasa para utilizarla en sus procesos productivos. Se puede enunciar que de manera general el uso de la biomasa no genera importantes impactos económicos para el país y por ende no se dispone de importantes avances tecnológicos ni de estadísticas en el tema.

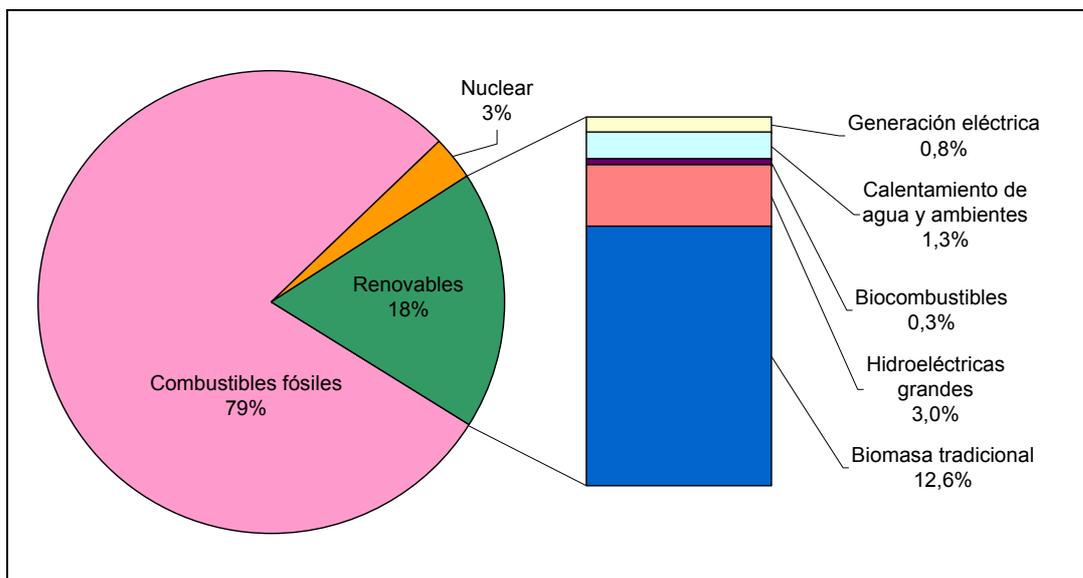
El uso de simulaciones computarizadas de procesos industriales como parte del sistema de enseñanza en las universidades del Ecuador no es aún una fortaleza del sistema educativo debido a las limitaciones económicas y del conocimiento del uso de estas herramientas, esto debido a que la adquisición de licencias de éste tipo de programas de computador representa fuertes inversiones así como el hecho de no disponer de docentes con la formación formal sobre el tema.

De acuerdo a la información disponible de las diferentes universidades y politécnicas del país no se dispone de ningún tipo de estudios recientes sobre el desarrollo de equipos de la obtención de energía térmica o eléctrica a través por intermedio de la combustión de biomasa residual.

1.1.3. Situación mundial

La energía renovable abastece el 18 por ciento del consumo final de energía a nivel mundial como se puede observar en la figura 1.1, que incluye a la tradicional biomasa, las grandes centrales hidroeléctricas, y las “nuevas” fuentes de energía renovable (pequeñas centrales hidroeléctricas, la biomasa moderna, la energía eólica, solar y geotérmica, así como los biocombustibles).

La biomasa tradicional, empleada principalmente para la cocción y la calefacción, representa alrededor del 13 por ciento y registra un leve crecimiento o incluso una disminución en algunas regiones, en vistas de que se la utiliza con mayor eficacia o se la sustituye por formas de energía más modernas. Las grandes centrales hidroeléctricas representan el tres por ciento y crecen en forma modesta, principalmente en los países en vías de desarrollo.



Fuente: Reporte 2007 de estatus global de energías renovables, Renewable Energy Policy Network.

Figura 1.1 Participación de la energía renovable en el consumo final global de energía del año 2006.

La evolución de la tecnología de aprovechamiento de la biomasa depende de factores económicos, políticos y sociales que muchas veces no pueden

predecirse, las tecnologías que se utilizan en el proceso de conversión de combustión se mantendrán vigentes en al menos los próximos 10 años, algunos desarrollos tecnológicos (refractarios, nuevos materiales de intercambio de calor que soporten altas temperaturas y corrosión, equipos auxiliares con mayores rendimientos, filtros cerámicos) aumentarán la eficiencia global de las calderas y quemadores por lo que los costos de generación de energía eléctrica y térmica disminuirán.

El uso de la biomasa en países vecinos ha tenido mejores expectativas y desarrollo que la ha tenido en Ecuador, como ejemplo de ello a continuación se describe algunos avances que se han desarrollado en Perú y Colombia.

En Perú se está instalando una planta de generación de energía a base de la combustión de cascarilla de arroz con una inversión de 16'600.000 usd. y pretende lograr una disminución de unas 14891 [ton/año] en la emisión de CO₂ provenientes del actual uso de combustibles fósiles; además el Centro de Demostración y Capacitación en Energías Renovables aborda el tema de uso de la biomasa residual como fuente energética en ladrilleras.

En Colombia la Universidad Autónoma de Occidente situada en la ciudad de Cali ha impulsado y desarrollado el proyecto "Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz" y que ha sido ganadora de varios reconocimientos nacionales en Colombia; además la Fundación Ecológica Colombiana dispone de estos equipos para ser distribuidos dentro la industria local colombiana.

En Colombia la empresa Super Brix esta comercializando el horno quemador de biomasa denominado TEO IV que esta concebido para utilizar a la cascarilla de arroz y su aplicación principal es el uso en el proceso de secado de granos, a continuación el la figura 1.2 se muestra el equipo que Super Brix comercializa a nivel regional (Colombia, Costa Rica, México).



Figura 1.2 Horno quemador de biomasa de la empresa Super Brix

La empresa Super Brix ha instalado éste tipo de sistemas en varios países en los últimos 5 años, 2 unidades en Colombia, 3 en Panamá, 2 en Honduras, 2 en México, 2 en Guyana Inglesa, 2 en Guyana Francesa, 2 en Costa Rica y 2 en Filipinas.

La simulación computarizada de procesos industriales en la actualidad es una ventaja competitiva que está generando un incremento en la ya extensa brecha tecnológica entre los países industrializados y los países en desarrollo, debido a que esta herramienta permite mejorar la eficiencia de los procesos productivos y por ende la reducción de sus costos.

1.2. Definición del problema

El perfeccionamiento del sistema para la obtención de energía térmica que tiene como fuente de generación de calor la combustión directa de biomasa residual requiere del desarrollo de análisis y estudios que permitan sustentar técnicamente futuras inversiones en él; sin embargo no se dispone de una simulación computarizada que permitan obtener información sobre el comportamiento de los dos flujos de aire que interactúan en el intercambiador de calor del sistema.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Disponer de una simulación computarizada del comportamiento térmico de los dos flujos de aire que intervienen en el intercambiador de calor del sistema de combustión de biomasa residual del equipo perteneciente al laboratorio de energías no renovables del DECEM

1.3.2. Específicos

- Definir las condiciones de entorno del sistema, escenario, a considerar en la simulación.
- Desarrollar un modelo computarizado tridimensional del sistema.
- Desplegar la información de los resultados de la simulación computarizada.

1.4. Alcance del proyecto

Conocer el comportamiento de la temperatura, velocidad y trayectoria de los dos flujos de aire que interactúan en el intercambiador de calor del sistema de combustión de biomasa residual, en un estado estable mediante el desarrollo de una simulación computarizada.

1.5. Justificación e importancia

Mantener un proceso de mejoramiento continuo del sistema de generación de energía térmica basado la combustión de biomasa residual requiere de inversiones de tiempo y dinero; el hecho de disponer de una simulación computarizada permite tener una importante reducción en el tiempo y costos requeridos para obtener información y un mejor entendimiento sobre el intercambiador de calor del sistema, con ésta información se puede identificar oportunidades de mejora que conlleven a incrementar la eficiencia global del sistema.

Por otra parte de este proyecto se podrá tomar información que sirva para el marketing del sistema y que facilite evidenciar los esfuerzos investigativos y económicos que se están realizando en el tema de las energías no convencionales en el DECEM.

En la actualidad el Ingeniero Mecánico debe estar preparado para usar herramientas computarizadas para el diseño o construcción de proyectos industriales, esto se evidencia de manera certera en industria como la Petrolera y de infraestructuras metálicas de gran envergadura donde estas herramientas son de uso cotidiano, sin embargo estas áreas ya están saturadas, con el laboratorio de energías no convencionales y proyectos como el presente que permitan incrementar el conocimiento en estas áreas, se pretende que los nuevos profesionales tengan mayores oportunidades en el desempeño laboral incursionando en áreas no tradicionales.

1.5.1. Posible solución

Se revisa la información técnica disponible en lo referente a planos y equipos con los que cuenta el sistema para elaborar el modelo computarizado tridimensional en el software CAD, Solidworks, a continuación se describe las condiciones y características del entorno del sistema con el fin de determinar un escenario que es reproducido de una manera aproximada en un software CFD, Floworks, se desarrolla la simulación y se obtiene la información necesaria para comprender el comportamiento (temperatura, velocidad y trayectoria) de los dos fluidos de aire que interactúan en el intercambiador de calor del sistema para la obtención de energía térmica, aire caliente, en base a la de combustión de biomasa residual.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Definiciones

A continuación se enuncian varias definiciones sobre términos que son frecuentemente usados en el presente documento.

Dominio: es un volumen que encierra en su totalidad al sistema y al cuál se limita el cálculo de la simulación.

Mallado: es el proceso mediante el cuál se fracciona una geometría compleja en pequeñas partes de formas simples, las formas simples se les denomina elementos finitos o volúmenes finitos.

CAD: (Computer Aided Design) Diseño asistido por computador, técnica que nos permite elaborar modelos computarizados de objetos o sistemas reales.

CFD: (Computational Fluid Dynamics) Dinámica de fluido computacional, técnica computarizada que permite elaborar una simulación del

comportamiento que podrían tener los fluidos bajo ciertas condiciones impuestas.

Análisis de flujo Interno: Es el análisis en el cuál se determina el comportamiento de un fluido que está encerrado, rodeado, por paredes (superficies) sólidas.

Análisis de flujo Externo: Es el análisis en el cuál se determina el comportamiento de un fluido que no está encerrado por paredes (superficies) sólidas, pero está definido dentro de un volumen teórico.

Aire frío: Es el aire ambiente que ingresa al sistema intercambiador de calor con el fin de que su temperatura sea incrementada. Este aire fluye por la parte interna de los tubos del intercambiador de calor.

Aire caliente: Es el aire que ha salido de la cámara de combustión y que ingresa al sistema intercambiador de calor con el fin de ser el suministro de calor hacia el “aire frío”. Este aire fluye desde la cámara de combustión de la biomasa residual, viaja por entre los tubos (parte externa) hacia la salida que da al medio ambiente.

2.2. Método de análisis por elementos finitos

El Método de Elementos Finitos (FEM por sus siglas en ingles) es una técnica numérica para el análisis de diseños de ingeniería y es aceptado como una técnica estándar debido a que es muy adecuada para su implementación computarizada. El análisis usando FEM es conocido como Análisis por Elementos Finitos (FEA por sus siglas en ingles).

El FEM se basa en el fraccionamiento de una geometría compleja en pequeñas partes de formas simples llamados elementos finitos, este proceso se denomina mallado, mostrado en la figura 2.1, que remplazan eficazmente un problema complejo por muchos problemas simples que requieren ser resueltos simultáneamente. Los puntos comunes que comparten los elementos finitos son llamados nodos.

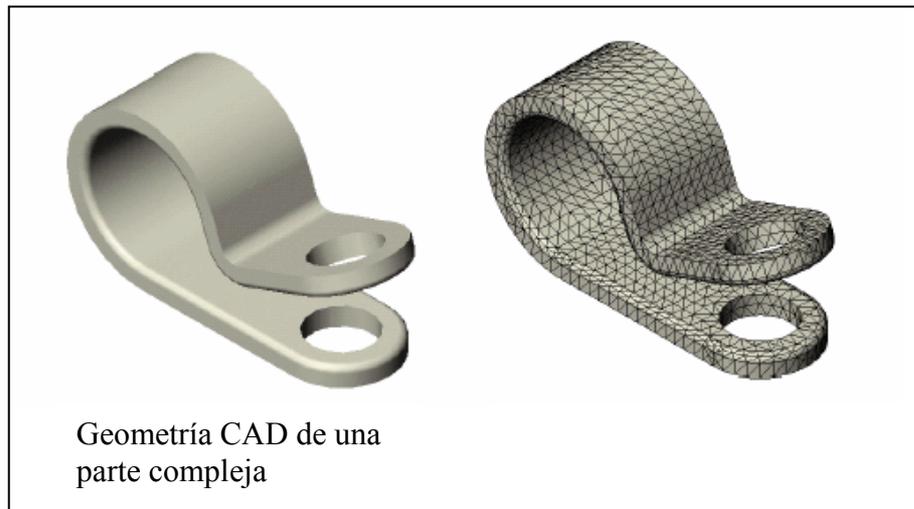


Figura 2.1 Mallado de una geometría

El comportamiento o reacción de cada elemento finito es calculado a partir de las reacciones de sus nodos; cada nodo está descrito por un número definido de parámetros dependiendo del tipo de análisis y del elemento finito usado. Por ejemplo la temperatura describe la reacción de los nodos en un análisis térmico; para un análisis estructural la reacción de los nodos esta descrita por sus tres rotaciones y tres traslaciones.

El FEM formula las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de cada elemento finito tomando en cuenta su conectividad con los otros elementos y las reacciones conocidas del material, apoyos, temperatura y cargas.

2.3. Dinámica de Fluidos Computacional

El estado físico de cualquier fluido (gas o líquido) está gobernado por los tres principios fundamentales de conservación de la masa, momento y energía. La Dinámica de Fluidos Computacional, CFD por sus siglas en ingles, es el conjunto de técnicas que permiten resolver las ecuaciones que se derivan de los tres principios anteriores, mediante las cuales se obtienen los campos de velocidad, temperatura y presión en el fluido estudiado.

Para el estudio de un fluido mediante la técnica CFD se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes y balances de energía sobre volúmenes de

control, es decir, sobre pequeños volúmenes de control definidos dentro de la geometría del sistema.

Los paquetes comerciales de CFD resuelven para todos los flujos ecuaciones de Navier-Stokes para la conservación de masa y del momento cuando hay flujo laminar sin transferencia de calor. Para flujos en los que está presente compresibilidad o transferencia de calor, se incrementa una ecuación adicional de conservación de la energía. Para flujos que implican mezcla de especies o reacciones, se resuelven ecuaciones de conservación de especies; si se emplea el modelo de combustión de no-premezcla, se resuelven ecuaciones de conservación para fracciones mixtas. Cuando el flujo es turbulento se resuelven ecuaciones adicionales de transporte.

2.3.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes reciben su nombre de Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes, se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en todo tipo de fluidos.

Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido, haciendo esto se obtiene la llamada formulación integral de las ecuaciones. Para llegar a su formulación diferencial se manipulan aplicando diferentes teoremas matemáticos, llegando así a la llamada formulación diferencial, que generalmente es más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos.

Como ya se ha dicho, las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales. No se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones, y salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas no es posible hallar una solución analítica; por lo que en muchas ocasiones se ha de recurrir al análisis numérico para determinar una solución.

La ecuación general de conservación de masa, o ecuación de continuidad, se define como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = S_m \quad (2.1)$$

El término S_m contiene la masa añadida por los cambios de fase; en general en la mayor parte de las simulaciones este término suele ser 0.

La ecuación para la conservación del momento en la dirección i y en una referencia no acelerada viene dada por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2.2)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido, t el tiempo.

x la coordenada de dirección, u la velocidad.

P la presión estática del fluido.

τ_{ij} el tensor de tensión, ρg_i es la fuerza de gravedad.

F_i es una componente de las fuerzas externas.

$i, j, k = 1, 2, 3$ representan las tres coordenadas de dirección

Las etapas de una simulación en el CFD son:

- Descripción aproximada del sistema a simular, es decir físicamente como funciona el sistema.
- Modelamiento tridimensional CAD del sistema.

- Definición del escenario a simular, representación de las condiciones iniciales y de entorno del sistema así como las propiedades físicas de los componentes presentes en el sistema.
- Desarrollo de la simulación, solución numérica del sistema físico señalado que incluyen el mallado, los criterios de convergencia y demás parámetros para el cálculo.
- Presentación de resultados, análisis de resultados y generación de representaciones (imágenes, videos) de los mismos

En general, la exactitud y precisión de los resultados obtenidos con esta metodología puede ser todo lo buenos que se desee, pero a costa de unos requerimientos computacionales muy elevados, por ese motivo, en la mayor parte de los casos se utilizan aproximaciones y modelos que permiten resolver los problemas con unos recursos computacionales razonables.

El futuro de la Dinámica de Fluidos Computacional es la incursión en avances tecnológicos como el desarrollo de modelos avanzados de turbulencia, como el DES (*Detached Eddy Simulation*), nuevos modelos y correlaciones para sistemas multifase, la utilización de mallas móviles (para la simulación, por ejemplo, de volúmenes variables con el tiempo, como podría ser el interior de un cilindro de motor) y el acoplamiento del cálculo CFD con el cálculo de tensiones y fuerzas en estructuras sólidas.

El principal inconveniente de la metodología son los elevados requerimientos y costes computacionales, que provocan en muchos casos la necesidad de utilizar computadores en paralelo.

La principal ventaja es que estos costos y el tiempo de respuesta acostumbran a ser siempre sensiblemente inferiores a los de experimentación o trabajos de campo.

2.4. Descripción del sistema de combustión de biomasa residual

El sistema de combustión de biomasa residual tiene como finalidad la calefacción de un ambiente cerrado a través del uso de la energía térmica obtenida de la combustión; consiguiendo esto a partir de tomar aire de los alrededores del sistema ($^{\circ}T1$), conduciéndolo por la acción de un ventilador por un intercambiador de calor donde se eleva su temperatura ($^{\circ}T2$) y finalmente trasladándolo hacia el ambiente cerrado, el aire caliente que ha salido de la combustión abandona el sistema hacia en medio ambiente ($^{\circ}T3$) a continuación en la figura 2.2 se observa un esquema del principio de funcionamiento.

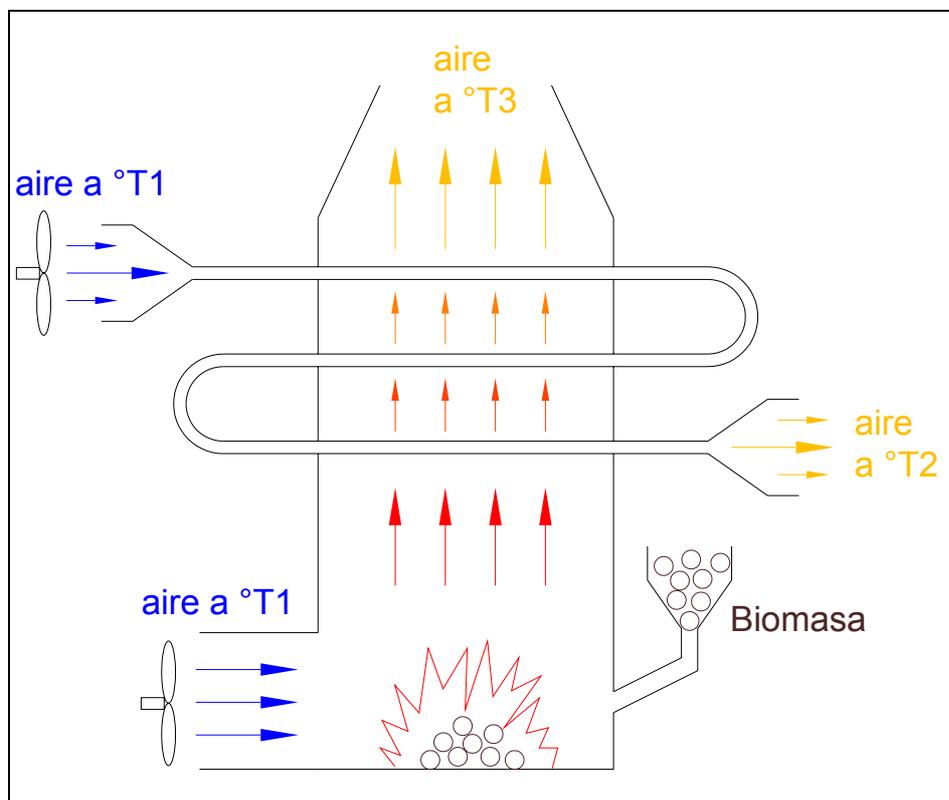


Figura 2.2 Principio de funcionamiento de sistema

La alimentación fraccionada y secuencial del combustible sólido al sistema de combustión y el movimiento del aire que es parte de esta combustión hacia el intercambiador de calor es lo que permite elevar la temperatura del aire que va hacia el ambiente cerrado, a continuación se muestra en la figura 2.3 un esquema del sistema.

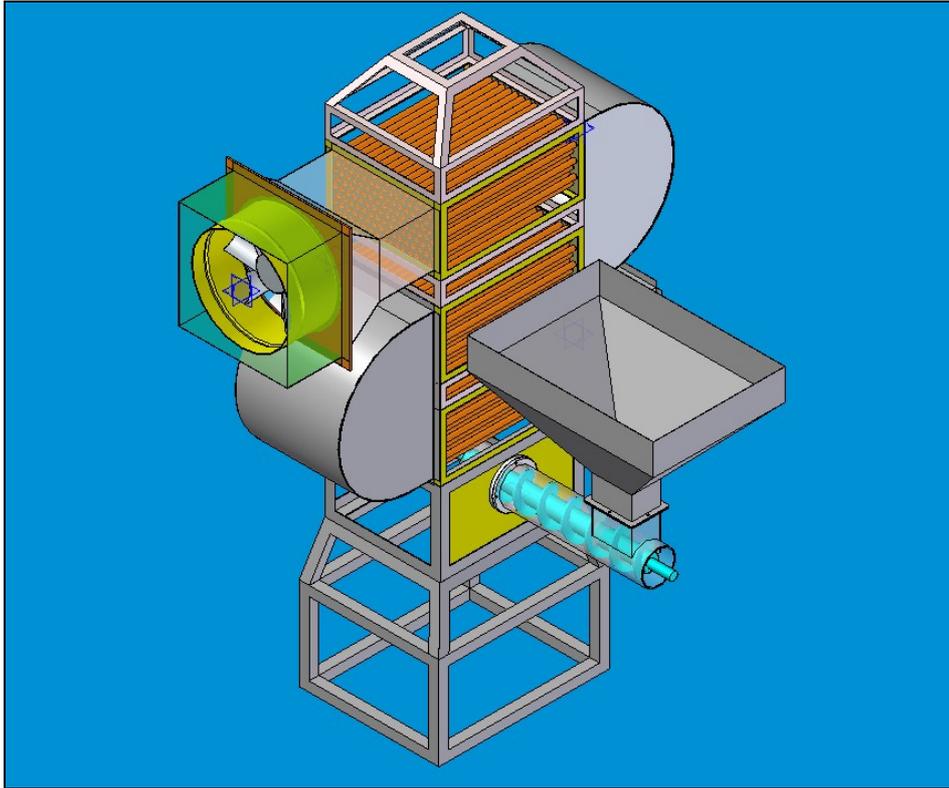


Figura 2.3 Esquema del sistema de combustión de biomasa

El modelo termofísico del sistema está compuesto por una cámara de combustión y un intercambiador de calor tipo "S" de tubos distribuidos en forma triangular. Para el desarrollo de la simulación la combustión será considerada como una fuente de calor estable que calienta al aire que ingresa al intercambiador de calor a una temperatura uniforme y determinada, a este aire es denominado aire caliente.

La admisión del aire caliente hacia el intercambiador de calor se lo realiza mediante un ventilador que se encuentra en el extremo inferior de este. El aire que ingresa a los tubos del intercambiador y que irá a lograr la calefacción de un ambiente cerrado es suministrado por un ventilador que es solidario a este sistema en la parte lateral superior, este aire es denominado aire frío.

A continuación en la figura 2.4 que es una fotografía del sistema, en la cual se observa los tubos del sistema y los ingresos de aire, tanto al intercambiador como a la cámara de combustión.



Figura 2.4 Fotografía del sistema de combustión de biomasa

Los datos técnicos generales del equipo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Características generales del equipo.

Característica	Valor	Observaciones
Dimensiones [m]	2,2x 2,4x 0,8	ancho x alto x profundidad
Peso [Kg]	400	
Temperatura de aire caliente de salida [°C]	20° a 90°	
Combustible	Biomasa residual	
Temperatura promedio del aire a la salida de la cámara de combustión [°C]	180°	Medido a cascarilla de arroz
Volumen de combustible en la cámara [m ³]	0,073	Aproximado
Tipo de intercambiador de calor	Coraza	Con tubos sin aletas en 3 pasos y distribución triangular
Movimientos de los fluidos del intercambiador	Mezclado	corriente de contraflujo cruzado

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL

A continuación se describe como se ha realizado la simulación del sistema de combustión de biomasa residual, teniendo como antecedente que la descripción física del sistema a simular ha sido descrita en el enunciado 2.4.

3.1. Modelamiento tridimensional del sistema

La elaboración del modelo CAD tridimensional en el programa SolidWorks se ha enfocado en considerar las geometrías principales del sistema, a continuación en la figura 3.1 se aprecia el modelado detallado del sistema construido.

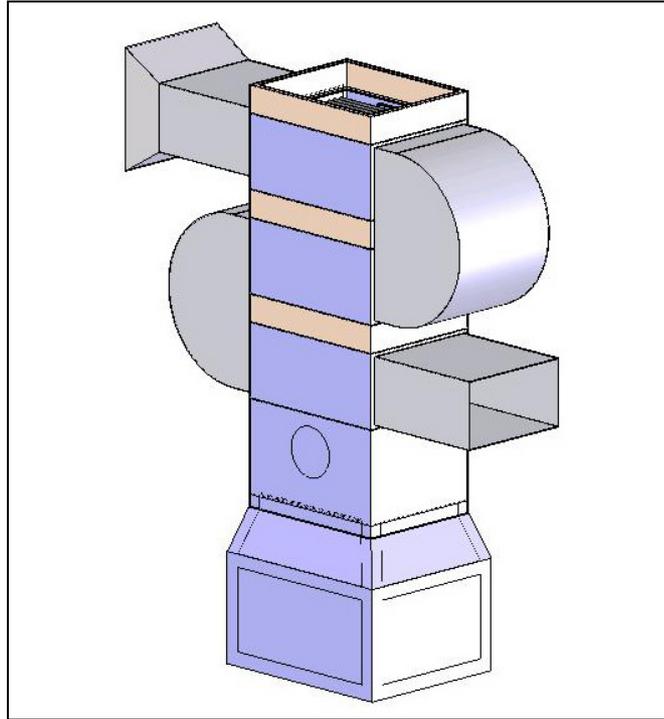


Figura 3.1 Vista isométrica- parte posterior del modelo detallado

En la figura 3.2 se muestra las entradas (orificios A y B) de aire donde se anclan los ventiladores que conducen al aire hacia el interior del intercambiador

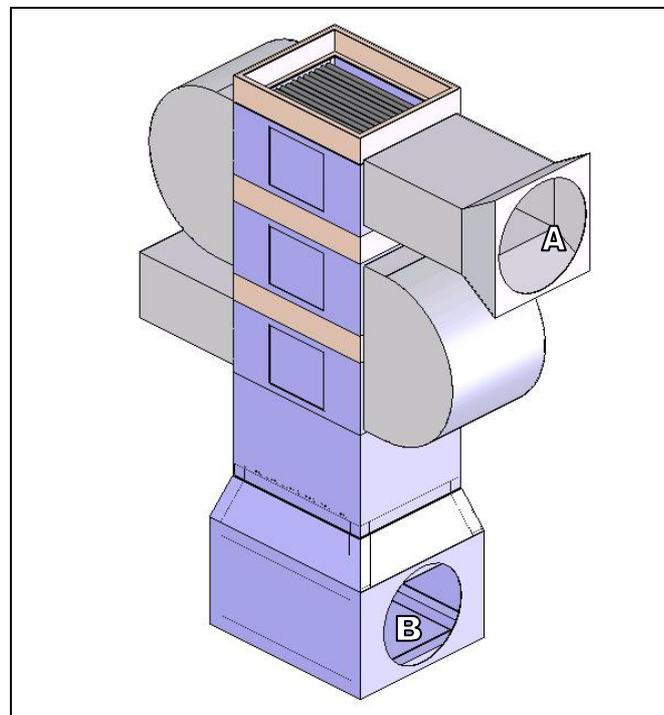


Figura 3.2 Vista isométrica – parte frontal del modelo

La figura 3.3 es una vista en corte longitudinal del sistema que muestra la como esta distribuido internamente los tubos del intercambiador y el bloque “C” representa el volumen aproximado de biomasa que está en combustión durante la operación del sistema.

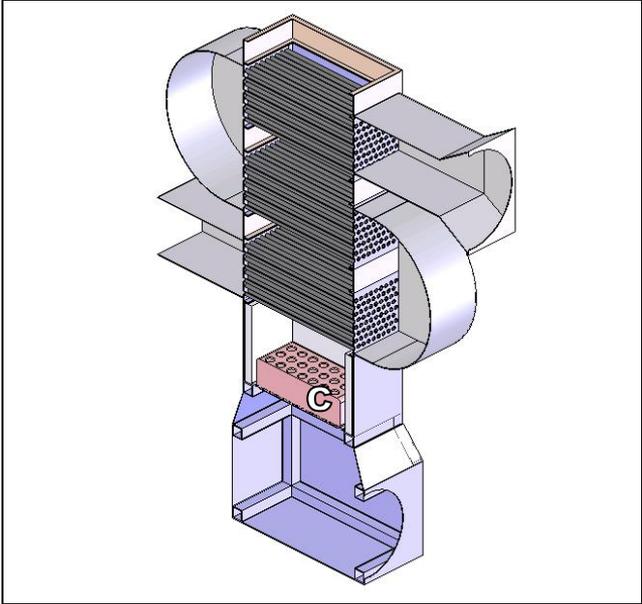


Figura 3.3 Vista isométrica frontal en corte longitudinal del modelo

La figura 3.4 es un corte transversal del sistema que muestra como estan distribuidos los tubos del intercambiador dentro del sistema.

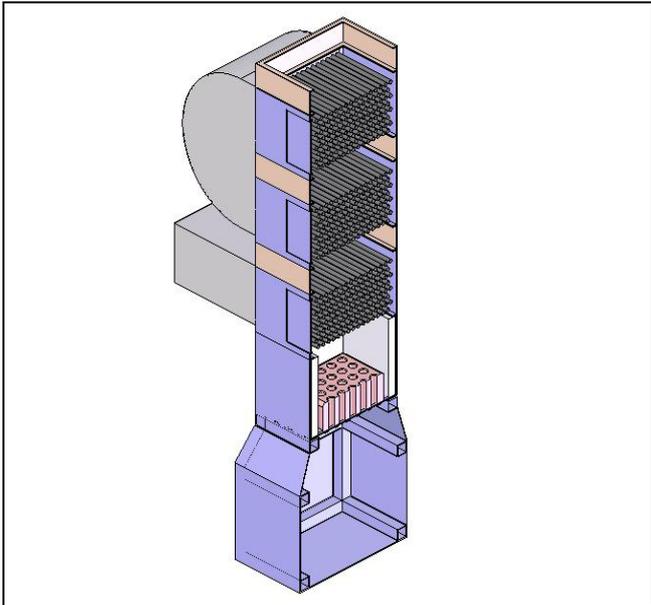
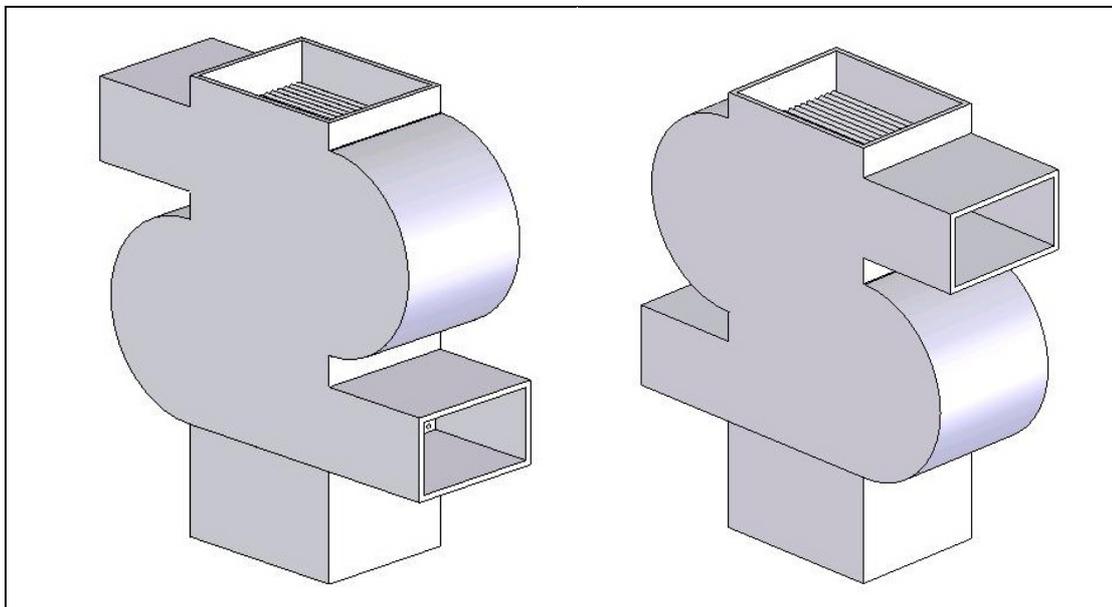


Figura 3.4 Vista isométrica frontal en corte transversal del modelo

Analizando las geometrías del sistema se ha considerado eliminar varios detalles del modelo para que los requerimientos computacionales (memoria RAM) no sean tan elevados. Estos detalles eliminados fueron:

- Exceso de longitud en el conducto de ingreso de aire a los tubos.
- Las 3 compuertas laterales del horno.
- Agujero de ingreso de biomasa residual y dobles de material en juntas empernadas.
- Diferencia de ancho entre la coraza y los conductos de ingreso y salida del aire de los tubos.
- Estructura inferior de ingreso de aire a cámara de combustión.
- Volumen representativo de la biomasa.

Dando como resultado la geometría presentada a continuación en la figura 3.5 que muestra como queda el modelo en la parte delantera y posterior:



a) parte posterior

b) parte delantera

Figura 3.5 Vista isométrica del modelo simplificado

A continuación en la figura 3.6 se puede observar como todos los detalles constructivos del interior del sistema han sido eliminados.

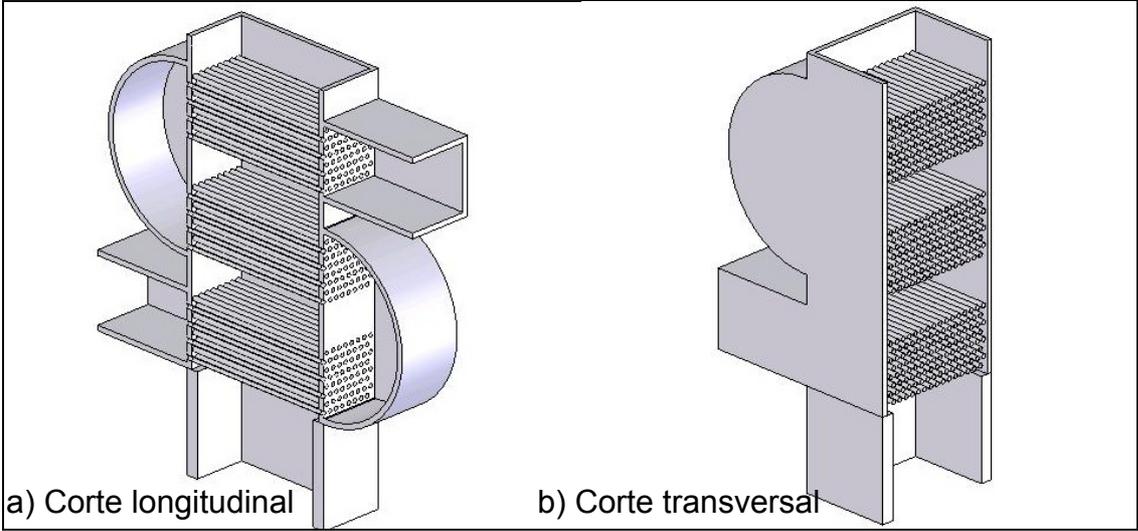


Figura 3.6 Vista isométrica en corte del modelo.

En la figura 3.7, 3.8 y 3.9 se muestran las medidas principales en el sistema:

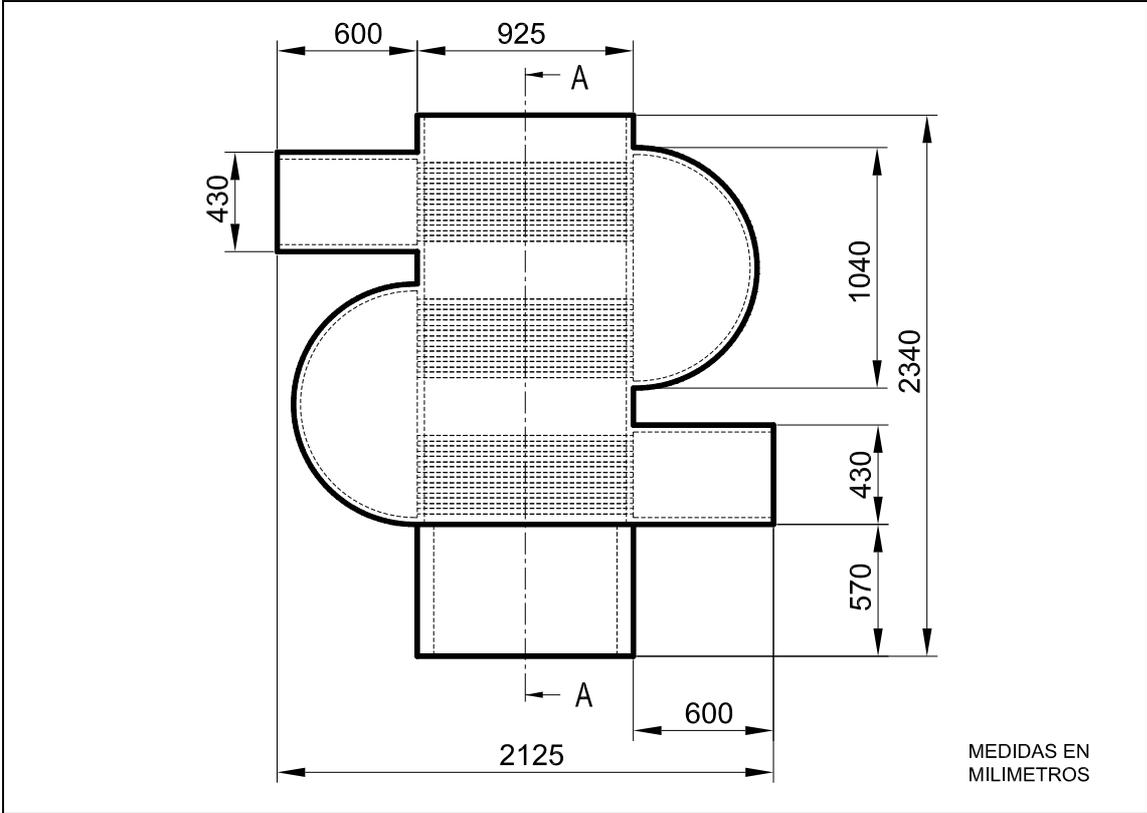


Figura 3.7 Vista frontal del sistema

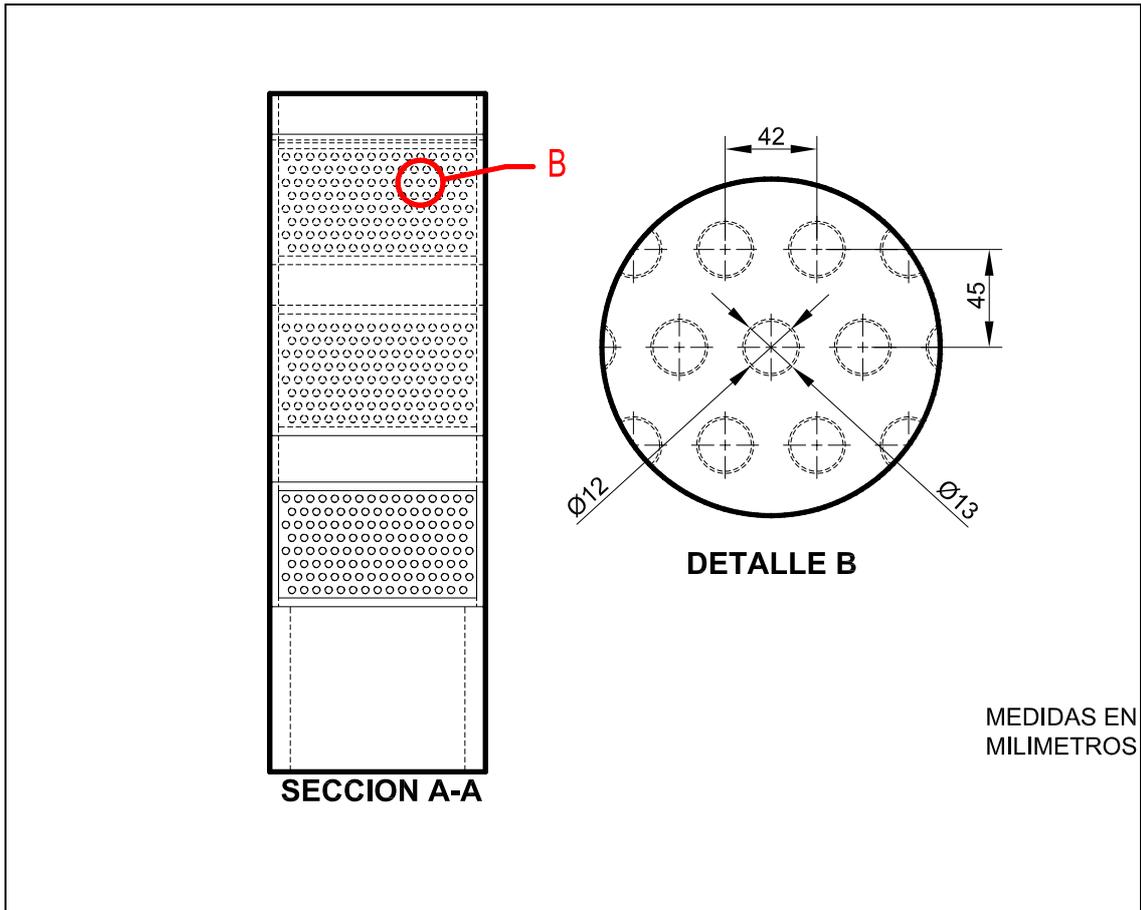


Figura 3.8 Vista de Sección A-A y Detalle B

En la figura 3.8 se puede apreciar la distribución de los tubos y en la figura 3.9 se puede observar la salida del aire que proviene de la combustión.

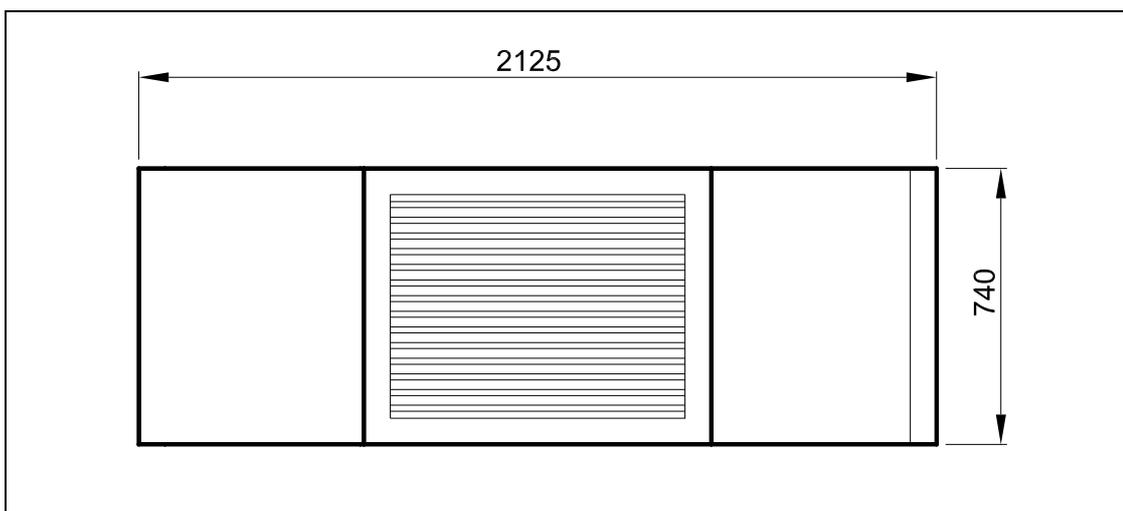


Figura 3.9 Vista superior del sistema

3.2. Definición del escenario a simular

El escenario planteado para simular el sistema de combustión de biomasa residual contempla un modelo matemático que describe la transferencia de calor entre el aire caliente que ha salido de la cámara de combustión de biomasa residual (aire que atraviesa el intercambiador de calor por la parte externa de los tubos) y el aire frío que ingresa al intercambiador y lo atraviesa por el interior de los tubos.

A continuación se describe como están representadas en la simulación las condiciones y propiedades generales del sistema físico.

- Tipo de análisis de flujo: El tipo de análisis definido para esta simulación es interno, debido a que los dos flujos están encerrados entre paredes (superficies) sólidas.
- Cavidades cerradas en el sistema: se excluyen para la simulación todas las cavidades cerradas que no tienen fluidos.
- Condiciones físicas: Se considera la transferencia de calor en superficies sólidas que están interactuando con los fluidos a si como un estado estable del sistema.
- Tipo de fluido: se consideró aire como el fluido laminar y turbulento en el análisis.
- Características de las paredes del sistema: Se considera paredes sin rugosidad y sin transferencia de calor hacia el entorno exterior del sistema, son de material acero A36.
- Condiciones iniciales del entorno: Se considera condiciones ambiente sin aire en movimiento a 18 [°C] y a 101325 [Pa].

3.3. Alternativas de simulación y desarrollo de la simulación

La carrera de ingeniería mecánica para el modelamiento CAD dispone del software SolidWorks y AutoCad; para la simulación de fluidos dispone solo de CosmosFloworks, por tanto la única alternativa de simulación computarizada es a través del software CosmosFloworks que es un complemento de SolidWorks.

A continuación se muestra el desarrollo de la simulación efectuada a los fluidos (aire caliente y frío) que intervienen en el intercambiador de calor del sistema de combustión de biomasa residual en el software CosmosFloworks.

3.3.1. Condiciones generales del escenario.

Una vez que se ha iniciado el programa CosmosFloworks, que esta integrado al software SolidWorks, se procede a abrir el archivo CAD que contiene el modelo tridimensional de sistema, con lo que aparece el modelo en la pantalla principal del software como se muestra en la figura 3.10.

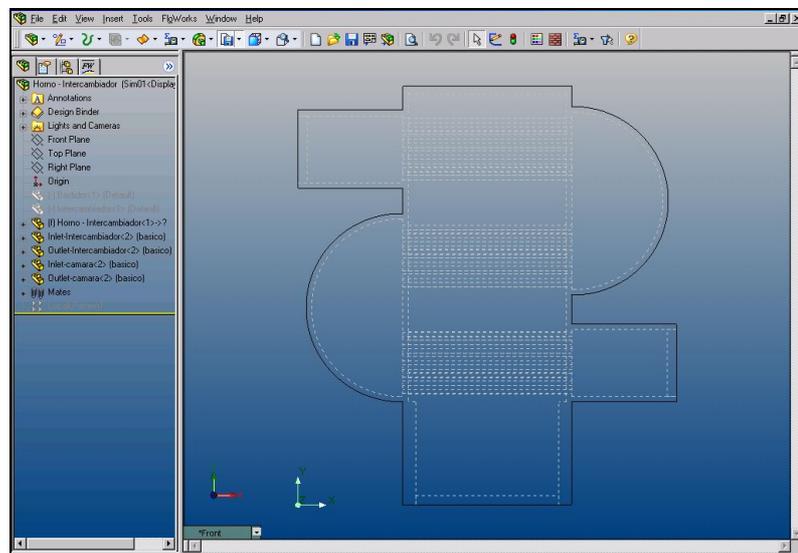


Figura 3.10 Modelo CAD del sistema de combustión de biomasa residual

En la figura 3.11 se muestra como se creo un proyecto que se lo ha denominado “Sim01”, éste estudio se configuró todas las condiciones físicas del modelo a simular, condiciones como las del medio circundante, materiales

del sistema, condiciones impuestas iniciales para los fluidos y las condiciones operativas del sistema.

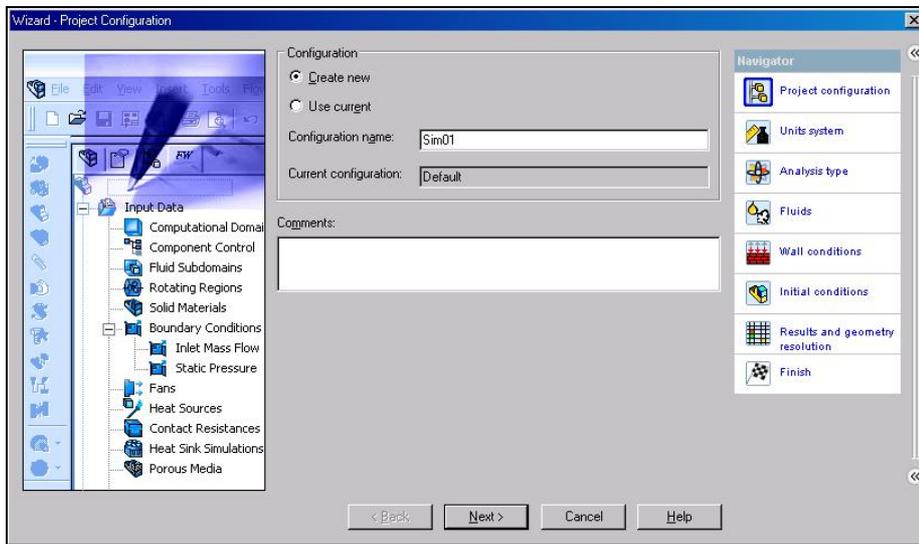


Figura 3.11 Creación del proyecto “Sim01”

Se define el sistema de unidades principal, como se muestra en la figura 3.12, con el que se ingresarán los datos y presentarán los resultados. Para este escenario se considera la longitud expresada en metros [m], el peso en kilogramos [Kg], la temperatura en grados centígrados [C°] y el tiempo en segundos [seg].

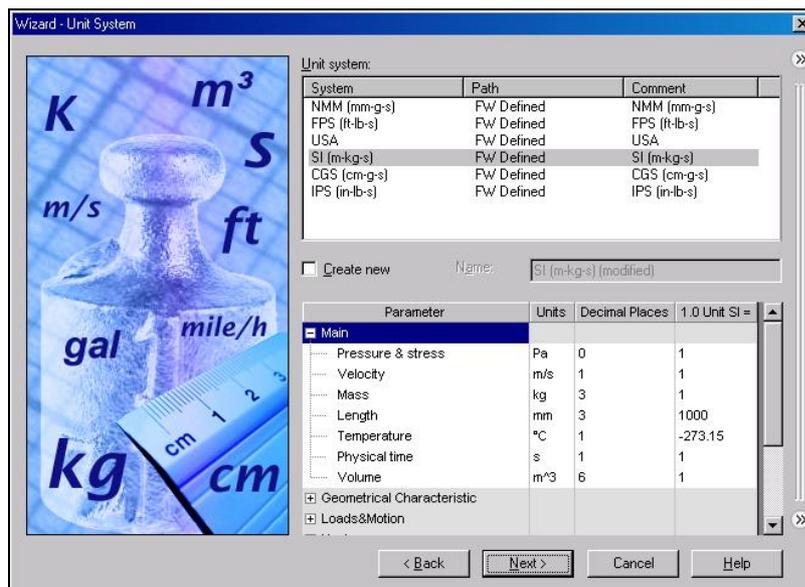


Figura 3.12 Definición del sistema de unidades principal

Se selecciona el tipo de análisis acorde al sistema, en este caso es interno; además se incluye la exclusión de cavidades dentro del sistema que no contengan fluidos así como la opción de conducción de calor en elementos sólidos y se lo define como se indica en la figura 3.13

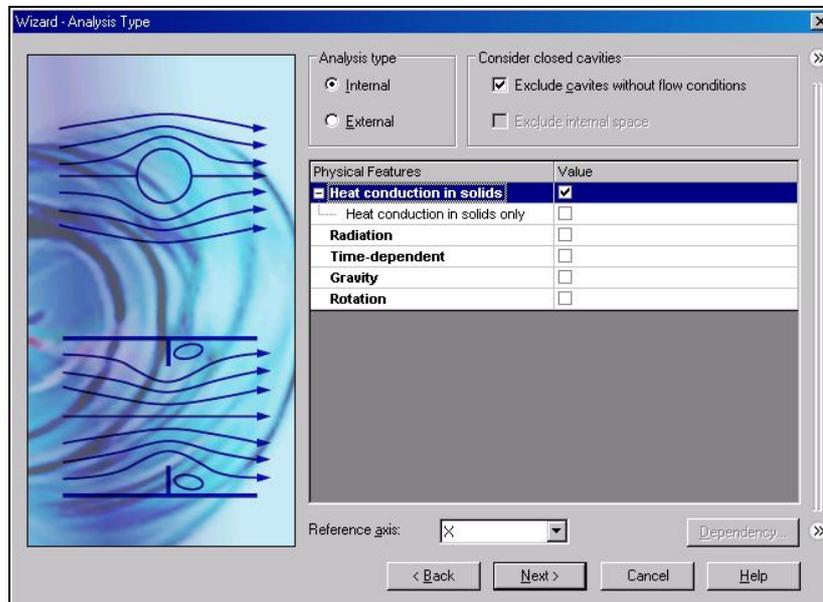


Figura 3.13 Selección del tipo de análisis y sus características

Se detalla el tipo de fluido que intervino en el estudio, que en este caso es aire, que incluye la característica de un fluido laminar y turbulento, figura 3.14

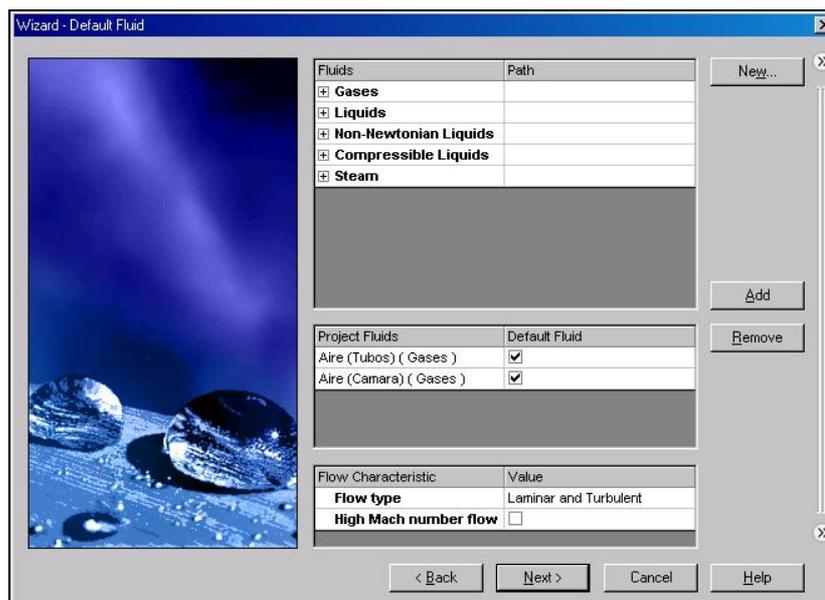


Figura 3.14 Detalle de fluidos y sus características

Se selecciona el material de las paredes sólidas del sistema, acero. Figura 3.15

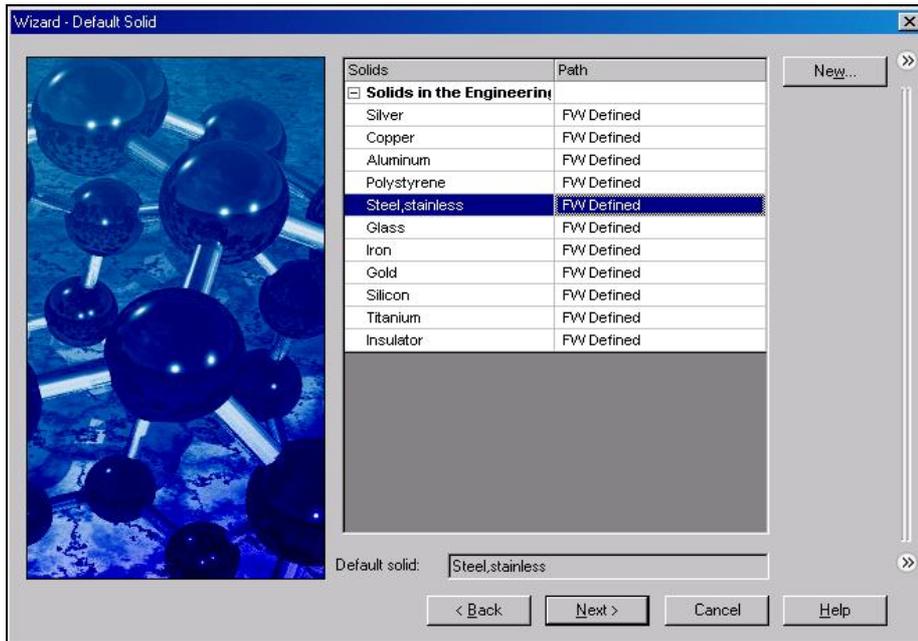


Figura 3.15 Selección del material de todos los componentes sólidos

Se considera que las paredes del sistema no tienen rugosidad y además se consideró que no hay transferencia de calor entre el medio ambiente externo y el sistema. Figura 3.16

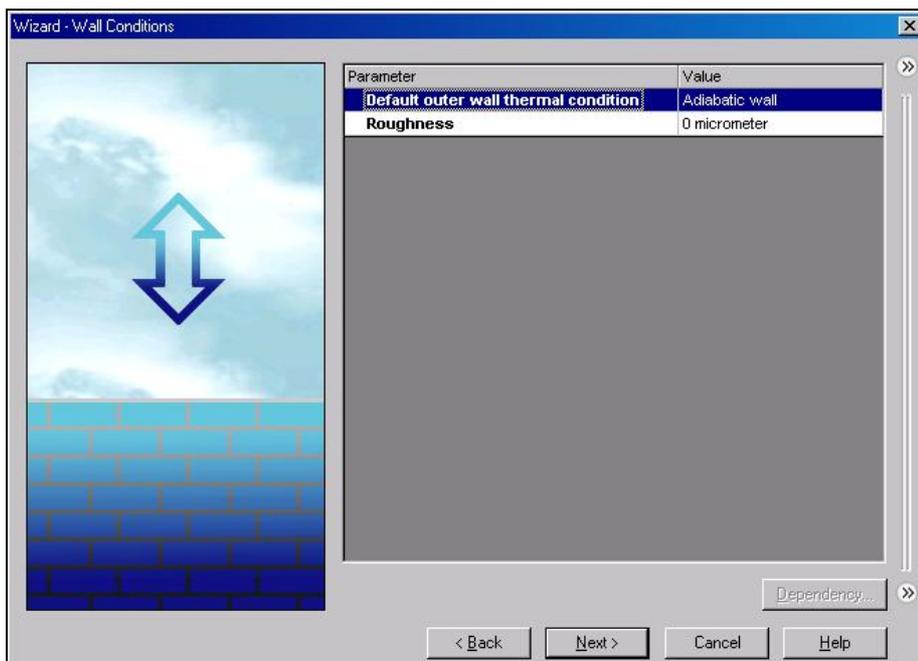


Figura 3.16 Condiciones de las paredes del sistema.

El aire circundante al sistema se considera en condiciones ambiente, sin movimiento a 18 [°C]. y a 101325 [Pa]. Definido como se muestra en la figura 3.17

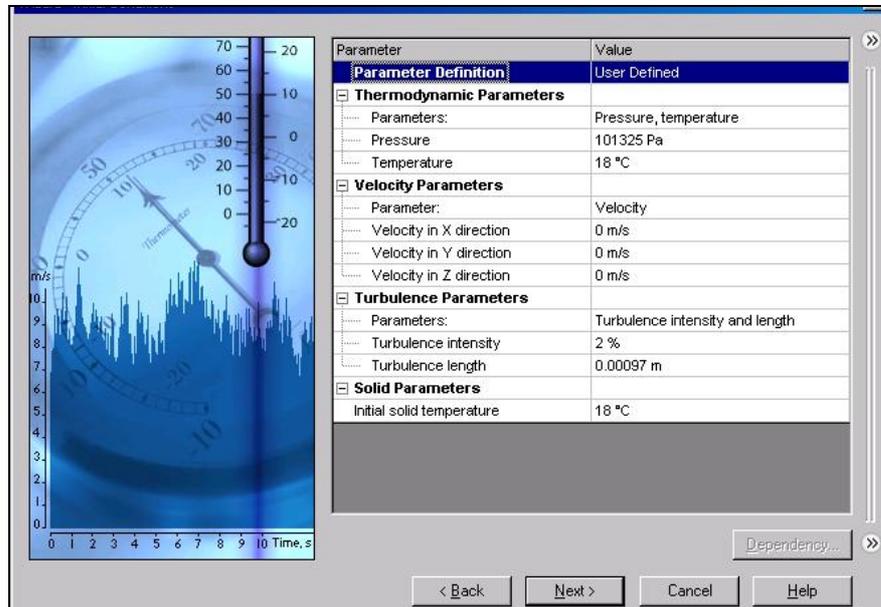


Figura 3.17 Condiciones iniciales del sistema.

En la resolución de la geometría y los resultados del estudio se uso el nivel estándar propuesto por el software, indicado en la figura 3.18

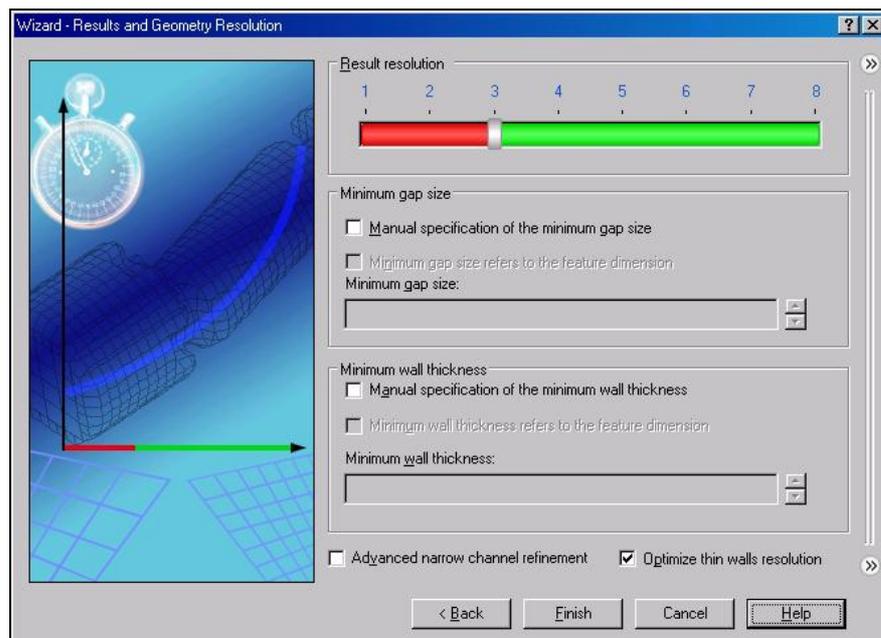


Figura 3.18 Resolución de la geometría y de los resultados del estudio.

3.3.2. Condición de simetría

Una vez que se ha introducido las condiciones generales del escenario, se continúa con la definición de simetría del sistema que permite mejorar la eficiencia del análisis. El sistema es simétrico respecto del plano XY del sistema coordinado del espacio tridimensional del software, dicho plano divide al sistema en dos partes iguales como se muestra en la siguiente figura 3.19

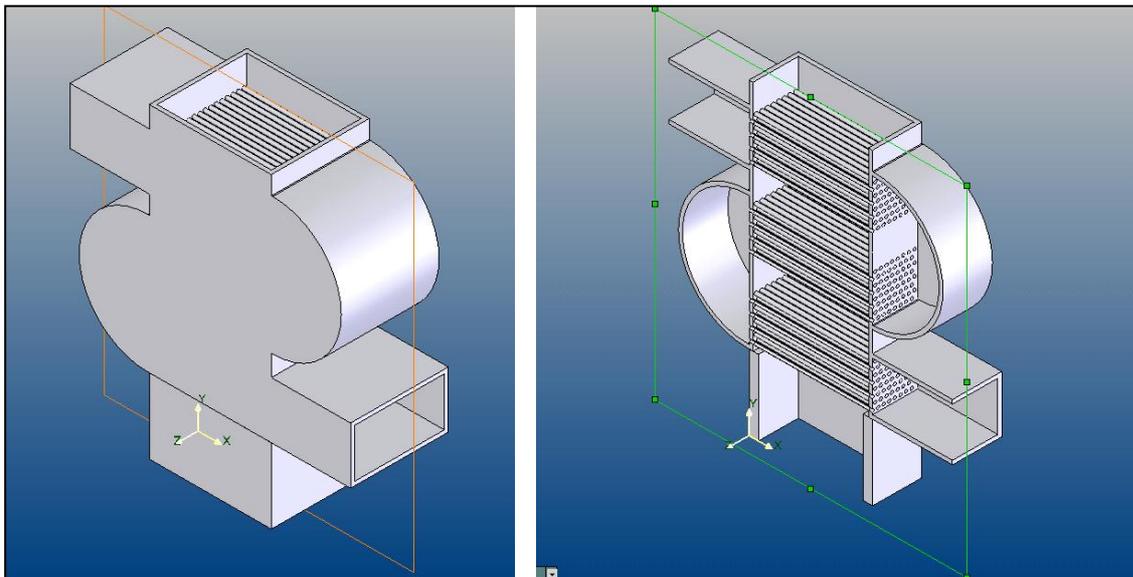


Figura 3.19 Plano de simetría del sistema

3.3.3. Condiciones iniciales de los fluidos

Para este sistema se ha considerado condiciones iniciales para el aire caliente que asciende por entre los tubos así como para el aire frío que viaja internamente por los tubos del sistema. Estas condiciones se las han incluido con el fin de disminuir el tiempo de simulación, estas condiciones van cambiando una vez iniciada la simulación.

La condición inicial para el aire caliente es la de una temperatura de 180 [°C] y una velocidad ascendente de 3 [m/s].

En la figura 3.20 se muestra el modo de ingresar esta condición inicial del aire caliente en la simulación.

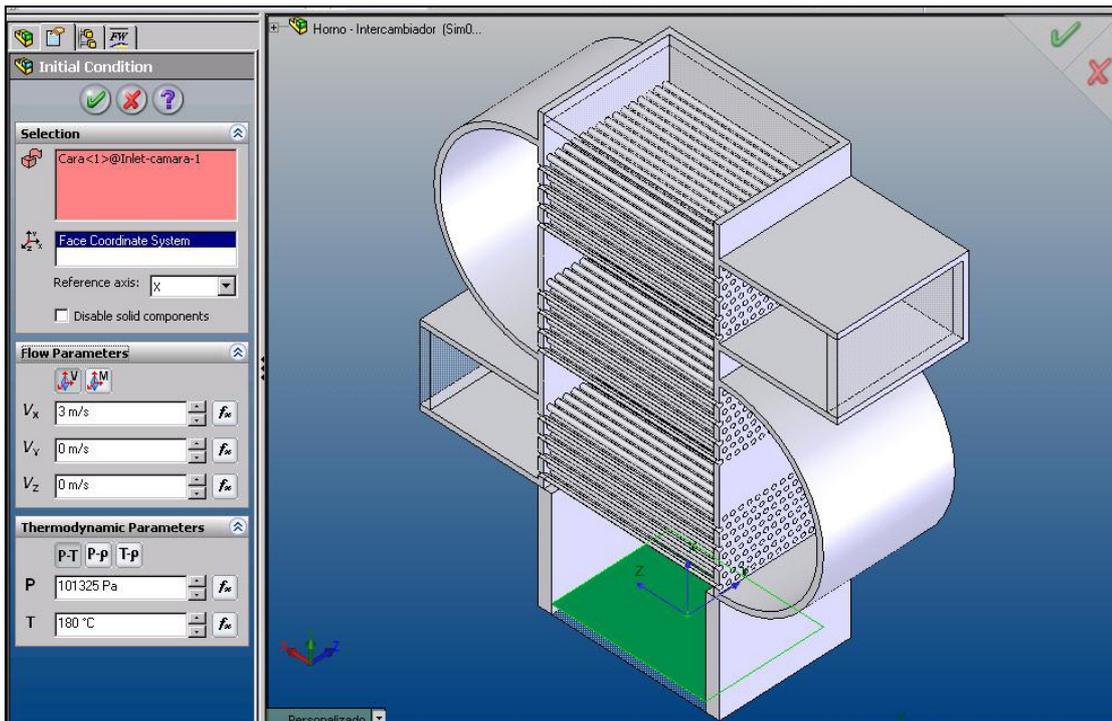


Figura 3.20 Condiciones iniciales del aire caliente

La condición inicial para el aire frío es la de una temperatura de 18 [°C] y este aire a diferencia del aire caliente en la simulación parte del reposo, velocidad cero en cualquier dirección, la figura 3.21 muestra esta condición.

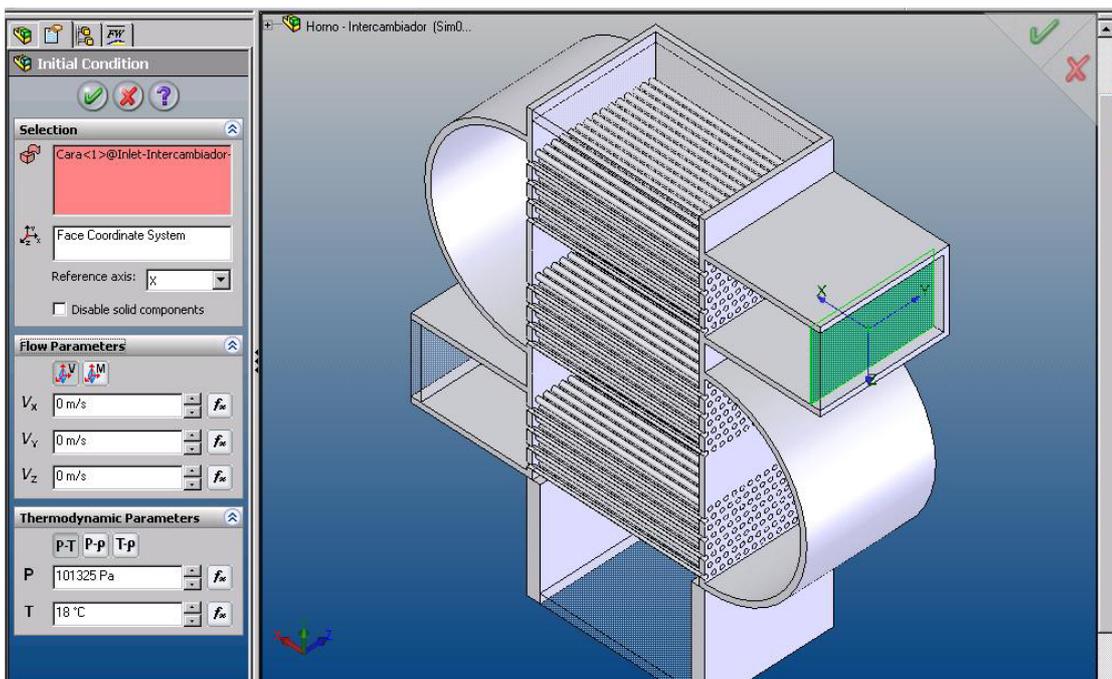


Figura 3.21 Condiciones iniciales del aire frío

3.3.4. Condiciones de frontera de los fluidos

Se han definido las condiciones de frontera, o entorno, para el aire caliente y aire frío, que básicamente consiste en definir dos circunstancias; la primera condición es la velocidad en que el aire frío y aire caliente ingresan al intercambiador y la segunda condición define a que condiciones de entorno (ambiente) se enfrentan el aire caliente y frío luego de atravesar el intercambiador de calor. A continuación se describe como se ingresó estas condiciones a la simulación.

Se ha definido la condición de frontera para el ingreso del aire frío hacia el interior de los tubos del intercambiador, mostrado en la figura 3.22, de tal manera que el aire que ingresa al sistema tiene una temperatura de 18 [°C] y una presión aproximada de 101325 [Pa]; que es un flujo constante de 3[m/seg]; que ingresa al sistema con una dirección paralela a la de los tubos del intercambiador o dicho de otra manera perpendicular a la sección transversal de canal de ingreso de aire frío del intercambiador.

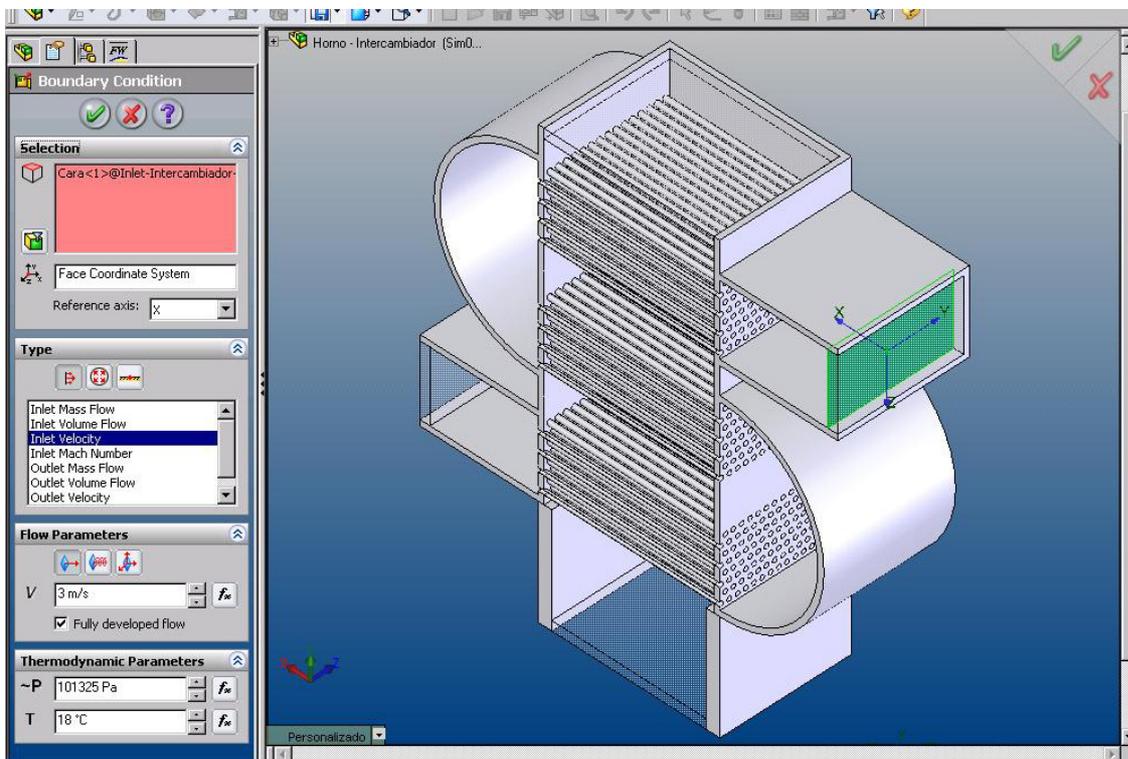


Figura 3.22 Condición de frontera del aire frío que ingresa al sistema

Se ha especificado la condición de frontera para el ingreso del aire caliente que viaja por entre los tubos del intercambiador, figura 3.23, considerando que ingresa a una temperatura de 180 [°C] y se encuentra a una presión aproximada de 101325 [Pa]; que ingresa al intercambiador con una velocidad de 3[m/s] y con una dirección transversal a la ubicación de los tubos en el intercambiador o considerado también como perpendicular al canal de ingreso de aire caliente al intercambiador.

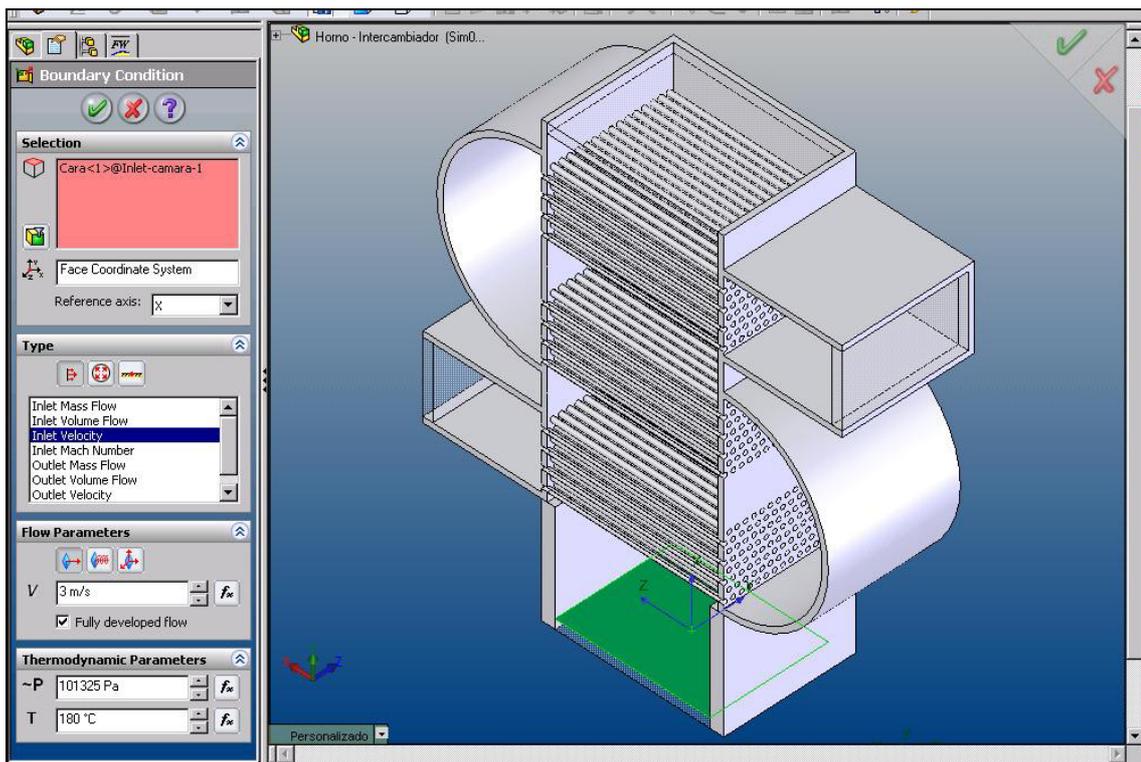


Figura 3.23 Condición de frontera del aire caliente que ingresa al sistema

Se ha señalado la condición de frontera por igual para los dos canales de salida de aire, tanto para el aire caliente como para el frío, definidas como salidas en contacto con el medio ambiente, a presión de 101325 [Pa] y a una temperatura de 18 [°C], esta condición es ingresada a la simulación como se muestra en la figura 3.24.

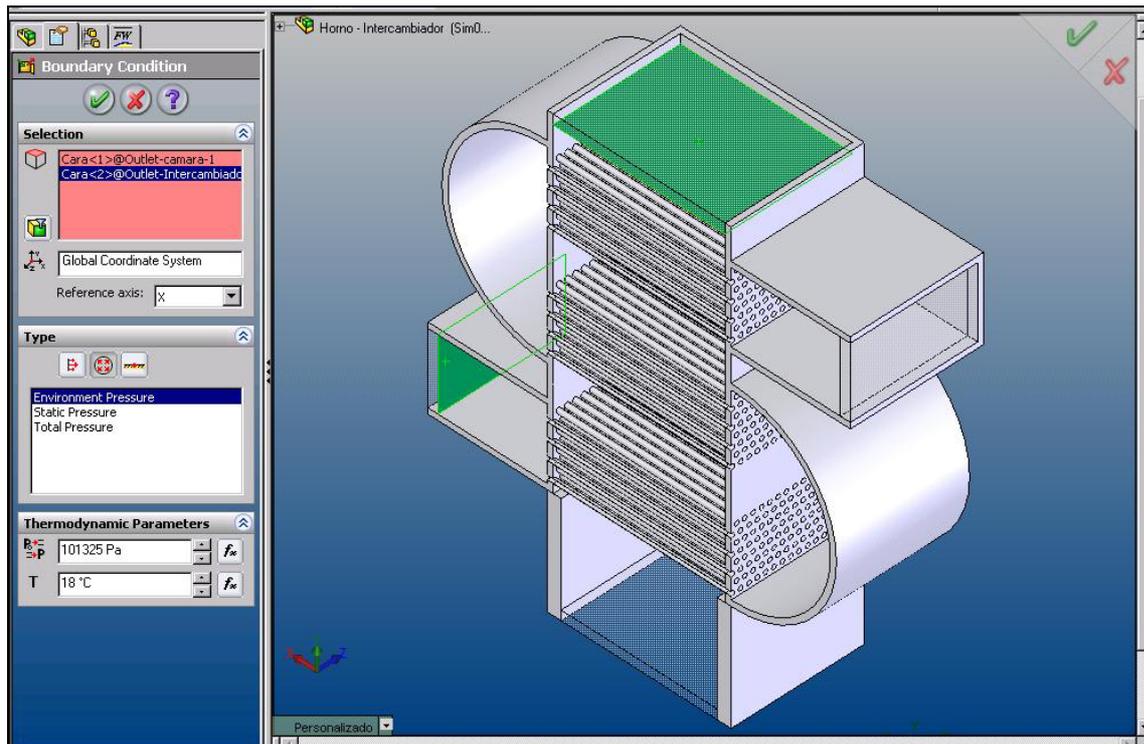


Figura 3.24 Condición de frontera del aire frío y caliente que salen del sistema

3.3.5. Especificación de materiales

Se ha definido los materiales con los cuales está hecho el intercambiador, siendo este el acero para los tubos y bastidor, ver figura 3.25; las “tapas” que están en los canales de los ingresos y salidas del intercambiador no deben ser considerados en el estudio así que se los definirá de material aislante, ver figura 3.26, esto debido a que únicamente están ahí como artificio geométrico para obtener caras o superficies donde definir las condiciones de frontera de los fluidos, tanto al ingreso como a las salidas de intercambiador.

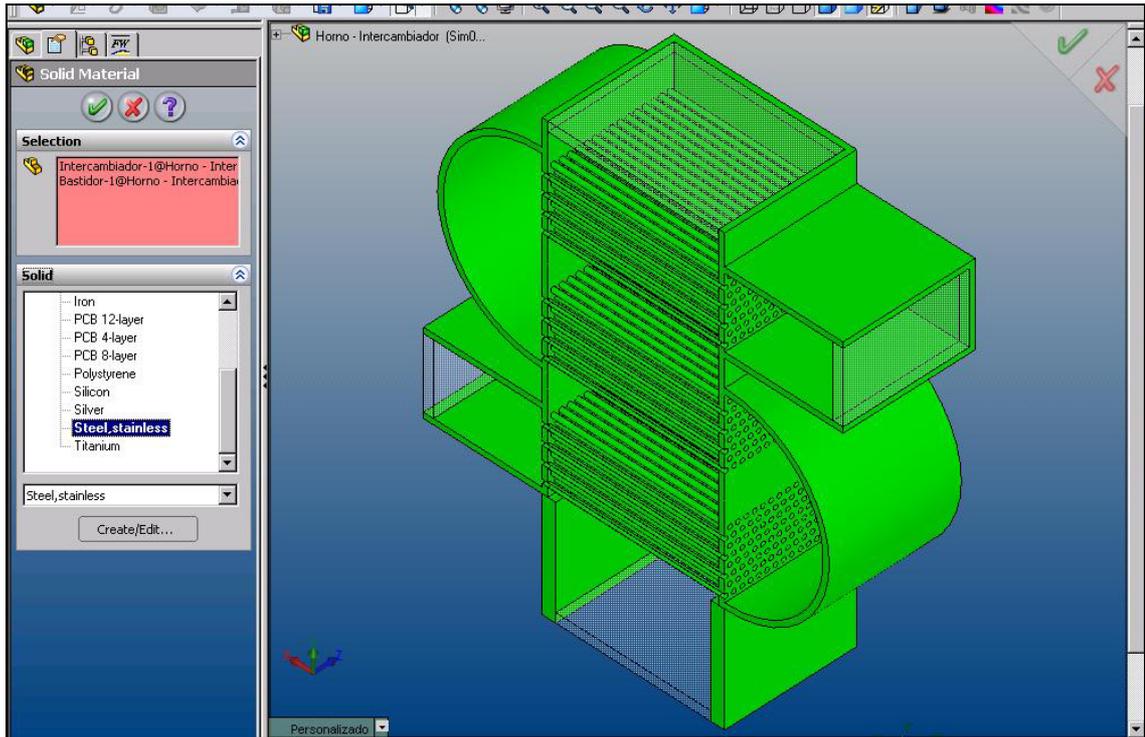


Figura 3.25 El material de los tubos y el bastidor

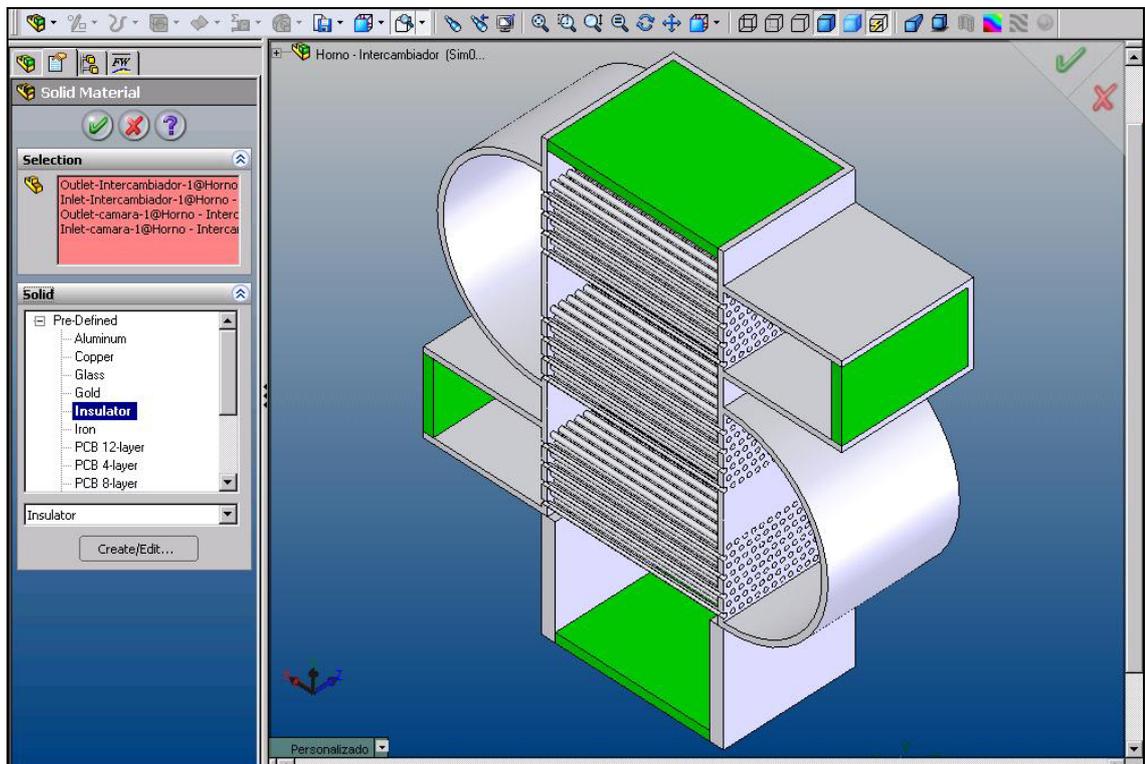


Figura 3.26 El material de las tapas

3.3.6. Parámetros de control en la solución de la simulación

Los parámetros que se han definido para el control de la simulación son dos, la velocidad y la temperatura del aire cuando esta dentro del intercambiador del sistema. Los dos parámetros de control tienen por finalidad determinar el momento en el cuál la simulación concluirá, la velocidad y la temperatura del aire son parámetros de carácter global en la simulación, es decir que la simulación concluirá cuando se han estabilizados de manera general o global la velocidad promedio y temperatura promedio del aire dentro del intercambiador del sistema.

Cuando se menciona estabilidad en un parámetro físico, velocidad o temperatura, dentro de la simulación se refiere a que su valor nominal se mantiene casi constante sin embargo se espera que tenga pequeñas variaciones en el tiempo.

En la figura 3.27 se observa el modo que se ingresa esta definición de parámetro de control a la temperatura del aire así como de seleccionar el valor promedio de cómo el valor que será monitoreado durante la simulación.

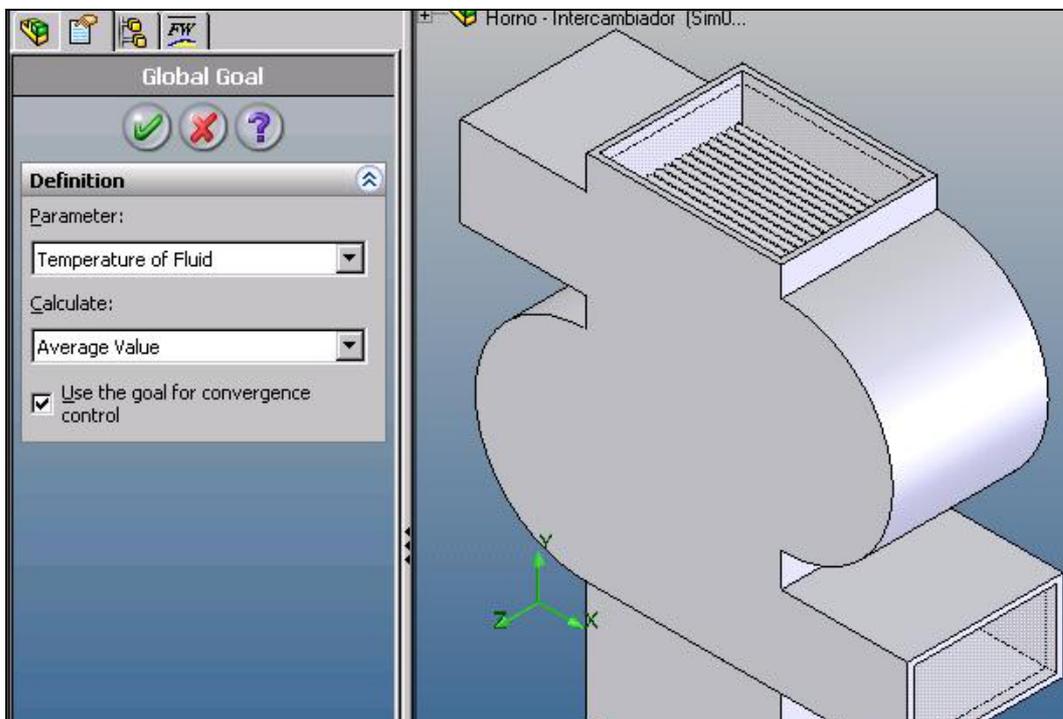


Figura 3.27 Definición de parámetro de control a la temperatura del aire

En la figura 3.28 se muestra el modo que se ingresa esta definición de parámetro de control a la velocidad del aire así como de seleccionar el valor promedio de cómo el valor que será monitoreado durante la simulación.

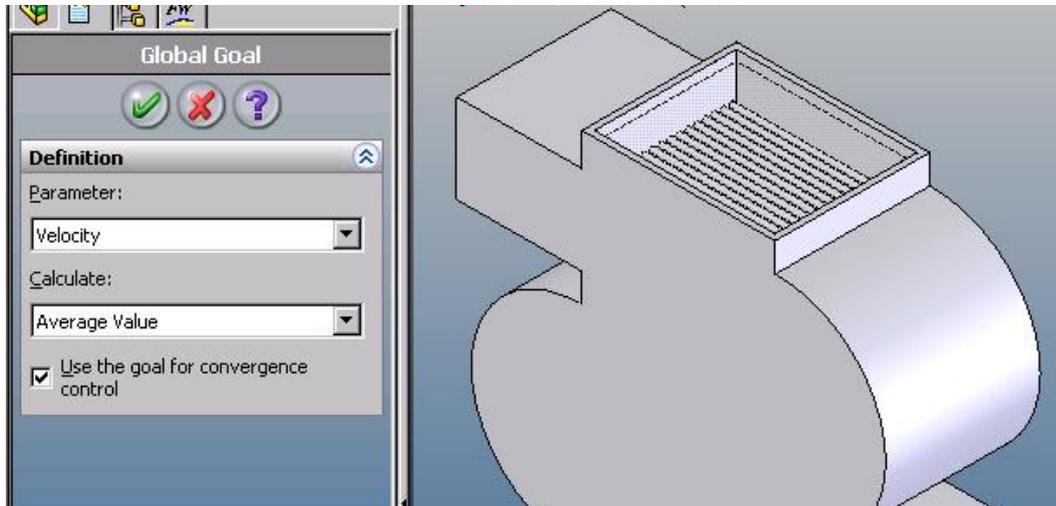


Figura 3.28 Definición de parámetro de control a la velocidad del aire

Se ha considerado que las dos variables, velocidad y temperatura del aire, sean usadas para el control de cálculo en la simulación, sin embargo se podría seleccionar únicamente una de ellas pero se podría tener que la otra variable no seleccionada aún no haya culminado su estabilización cuando la simulación haya finalizado.

3.3.7. Parámetros de la malla

Se definió parámetros de la malla en función de una tener una malla que contenga todas las geometrías del sistema, este es un paso importante ya que de la correcta configuración de estos parámetros evitará tener un tiempo de cálculo de la simulación muy extenso sin que sea requerido.

En la figura 3.29 se muestra la instancia en la cual se verifica la activación de la opción “Optimizar la resolución de paredes delgadas (Optimize thin wall resolution)”, así como de mantener el nivel de la malla inicial en 3, que es el valor que el software recomienda para el cálculo de la simulación. Además es conveniente usar las opciones predefinidas del software para la malla inicial del sistema.

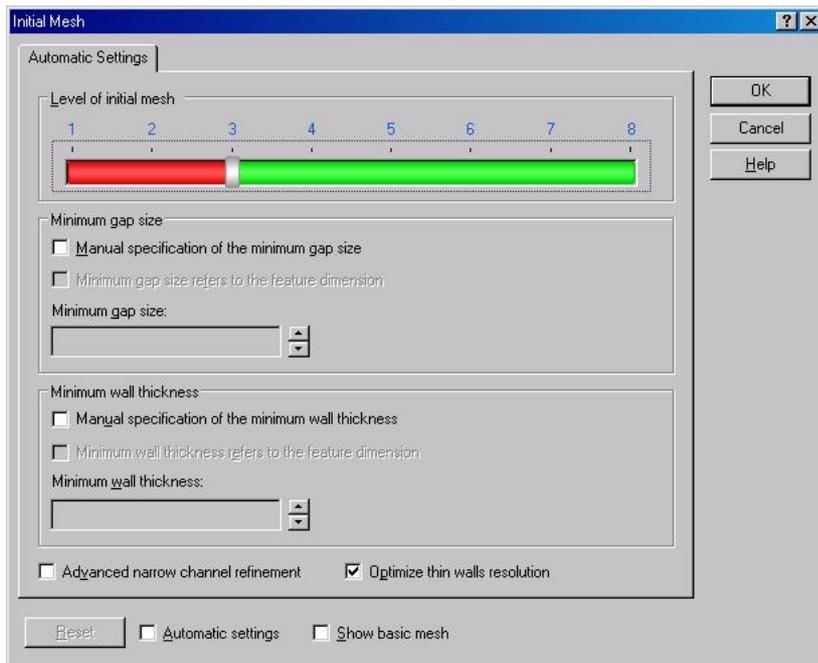


Figura 3.29 Optimización de la resolución de la malla en paredes delgadas

Se continuó verificando, ver figura 3.30, que la malla inicial cubra todos los detalles geométricos del sistema a través de observar cuidadosamente si la se esta dividiendo a las pequeñas geometrías en varios volúmenes.

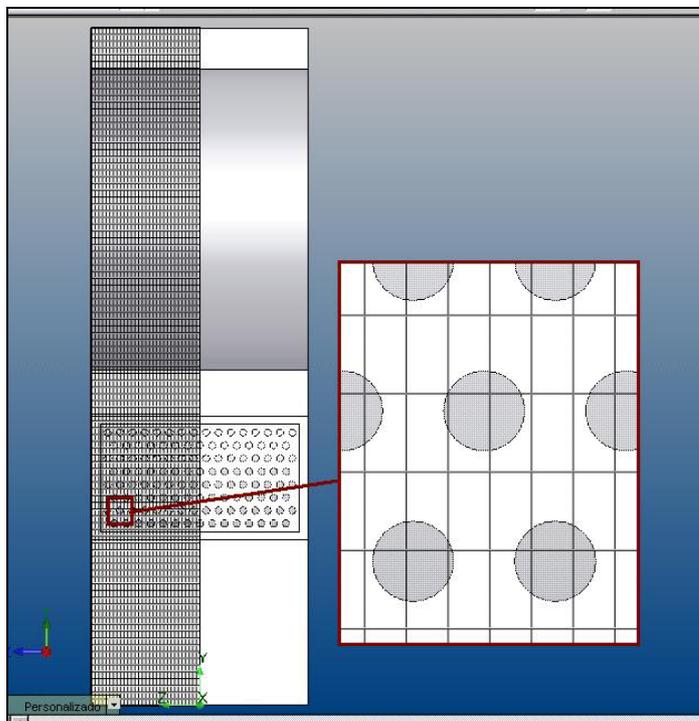


Figura 3.30 Verificación de malla inicial del sistema sobre el modelo cad.

En la figura 3.31 se muestra desde diferentes vistas como el sistema se ha dividido en zonas de diferente tamaño debido a que esto contribuye a facilitar el mallado final y precisión en el cálculo.

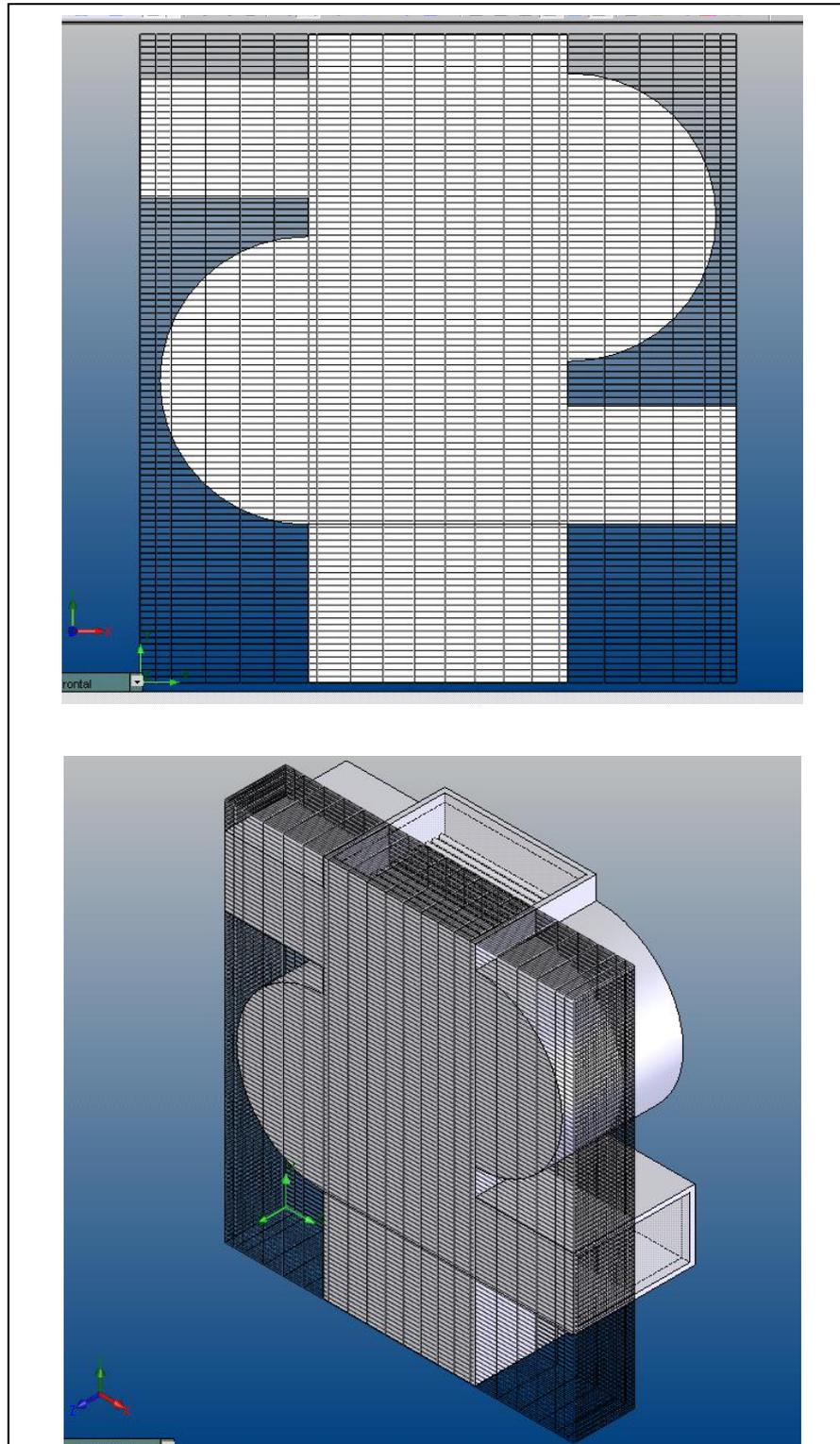


Figura 3.31 Vista general de la malla inicial sobre el modelo cad del sistema.

3.3.8. Inicio de la simulación

El primer paso que se realiza en la corrida de la simulación es crear la malla, ver figura 3.32, que se usa al calcular el comportamiento del fluido dentro del sistema.

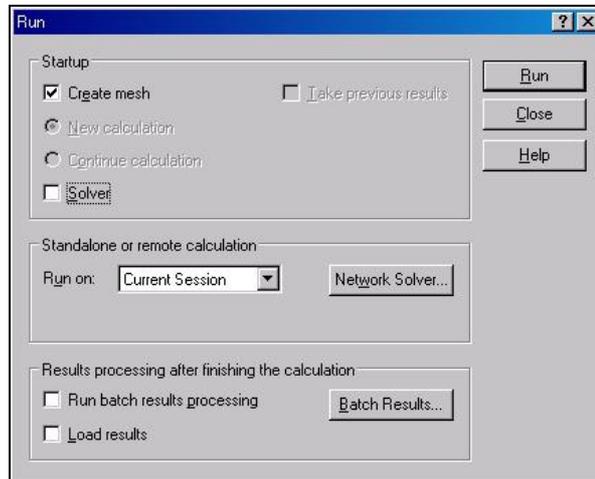


Figura 3.32 Creación de la malla final usada en el cálculo.

En este punto es importante verificar que las zonas curvas del sistema tengan una mayor cantidad de celdas de la malla que las zonas rectas, ver figura 3.33, por otro parte que la cantidad total de celdas de la malla no excedan los recursos disponibles del ordenador.

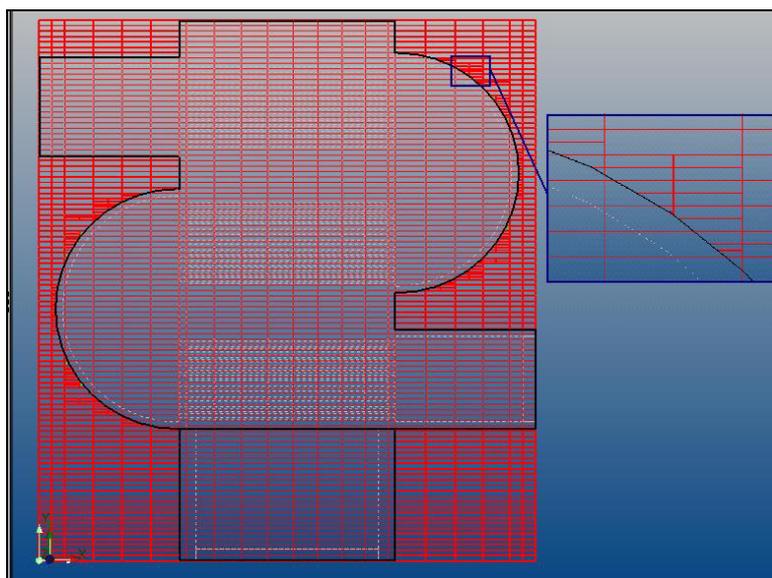


Figura 3.33 Malla final del sistema

En la figura 3.34 se verifica que los tubos estén siendo adecuadamente identificados en la malla, en este caso las celdas verdes representan los tubos del sistema.

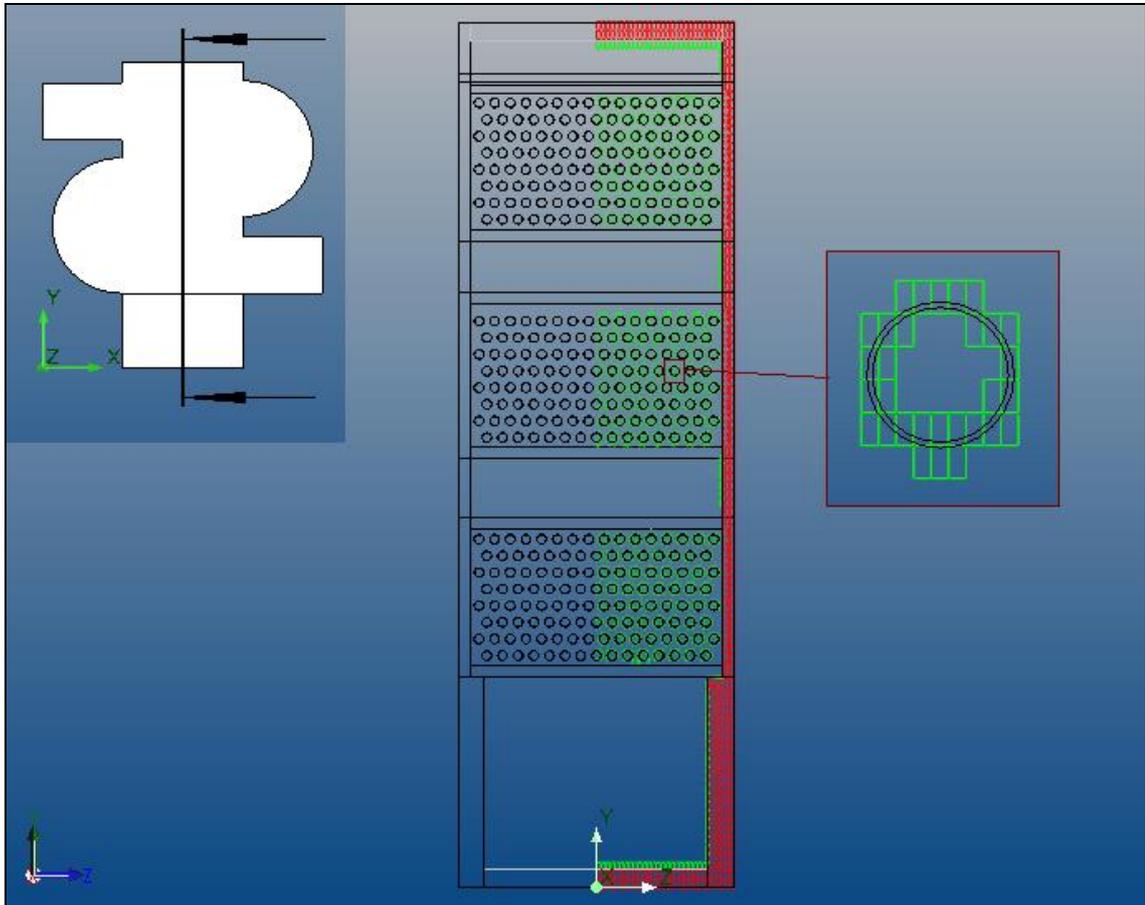


Figura 3.34 Mallado final de los tubos del intercambiador de calor.

Una vez que se ha concluido la verificación que la malla ha sido adecuadamente generada se procedió a evaluar si existe la factibilidad de resolver (simular) el sistema propuesto; de este análisis se puede enunciar que:

- El sistema se ha formado con un número total de 907974 celdas
- La memoria RAM requerida para cargar la malla es de 1.5 [GB] y la memoria RAM requerida para calcular la simulación será de 2 [GB].
- El tiempo necesario para el cálculo de la simulación no se lo puede definir certeramente sin embargo se puede estimar que llevará un aproximado de 150 horas de cálculo si se dispone de un ordenador con

recursos computacionales altos (4GB de RAM y procesador superior o igual a 2.8 GHz de velocidad)

De acuerdo a lo expuesto anteriormente se definió que se debe realizar ciertos ajustes con el fin de obtener una simulación que no requiera de excesivos recursos computacionales y que el tiempo que tome la simulación no sea muy extenso.

3.3.9. Ajustes a la simulación – Geometría y malla modificada

Se ajustó la geometría a una zona representativa del sistema, ver figura 3.35, para este caso se consideró una cuarta parte de la geometría total.

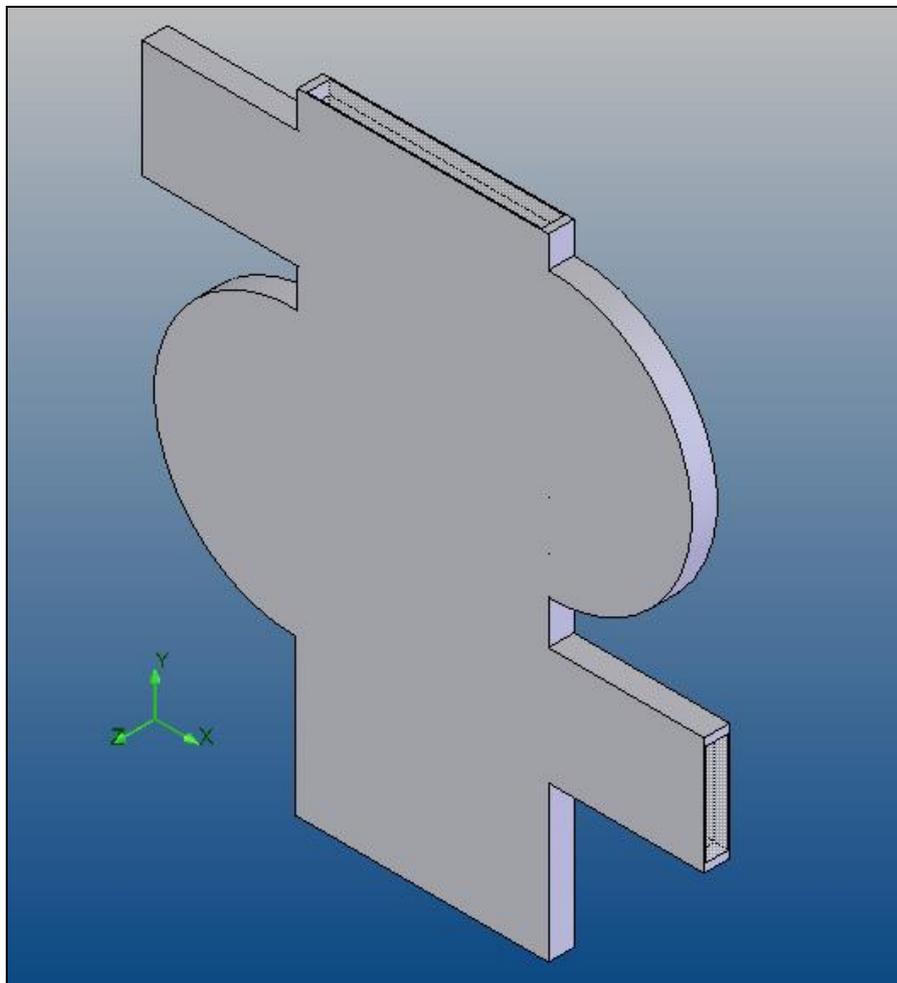


Figura 3.35 Modelo CAD tridimensional modificado

Como vemos en la figura 3.36 el sistema mantiene su concepto, sus tres filas de tubos, sus respectivos ingresos y salidas de aire, la distribución de los tubos y además se puede visualizar el pequeño espesor de los tubos respecto a la dimensión del sistema.

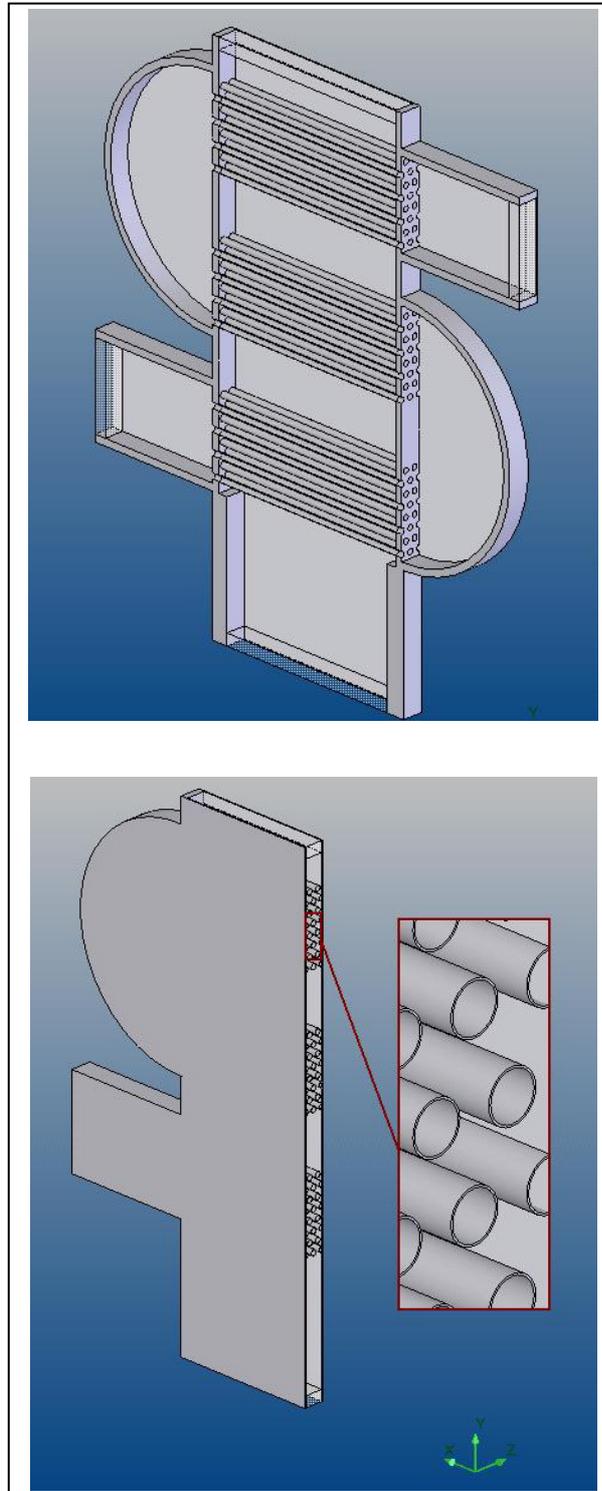


Figura 3.36 Detalles de modelo CAD tridimensional modificado

Se generó una malla inicial para esta geometría y en las 3 figuras que están a continuación se puede observar la forma en que la malla inicial cubre la totalidad de la geometría, ver figura 3.37, así como ciertos detalles importantes del sistema, se consideró que en la malla esté contemplada las paredes que limitan el recorrido del aire tanto en sentido ascendente como en sentido horizontal descendente y como la malla inicial representa a los tubos que están dentro del sistema.

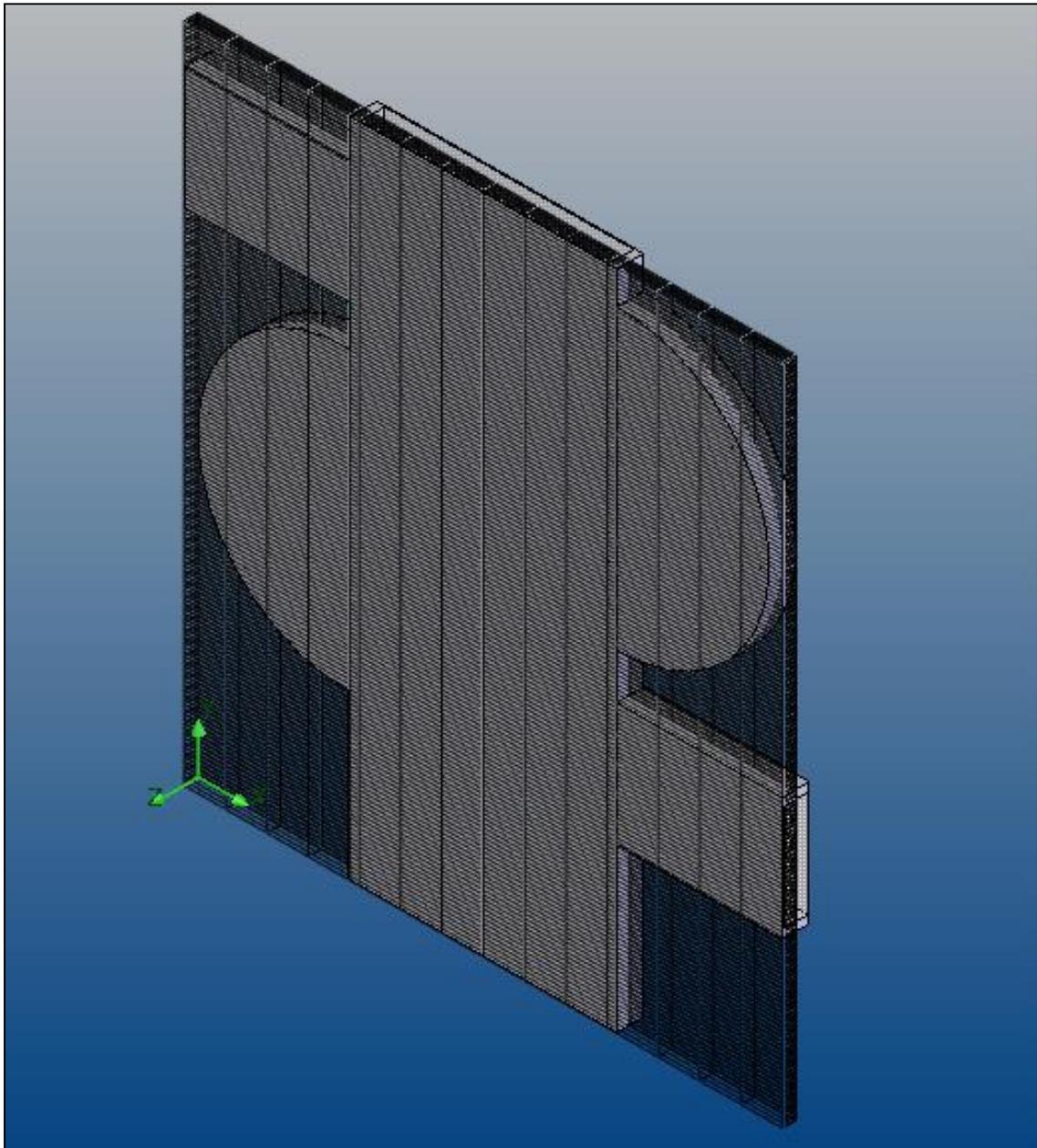


Figura 3.37 Vista isométrica de la malla inicial del sistema modificado.

En la figura 3.38 se muestra como la malla considera de manera particular las paredes de la coraza, este detalle importante da un valioso aporte a la generación de una adecuada malla final del sistema modificado

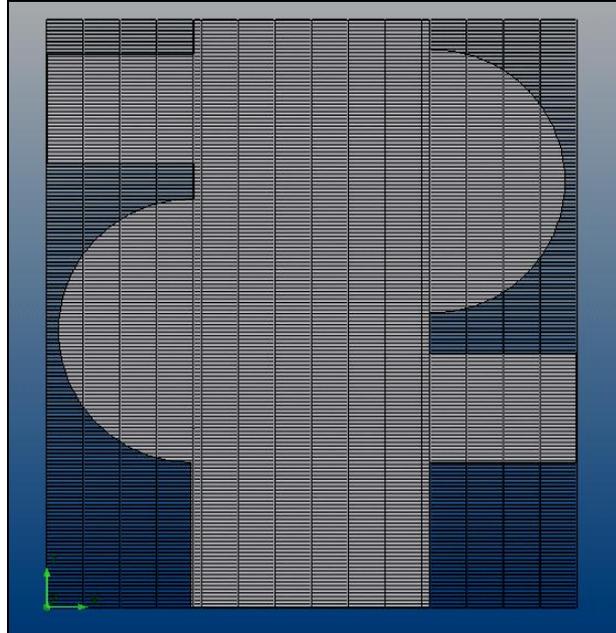


Figura 3.38 Vista frontal de la malla inicial del sistema ajustado.

En la figura 3.39 es destacable que cada tubo del sistema ahora es dividido en un número mayor de celdas, lo que mejora la fiabilidad de la simulación.

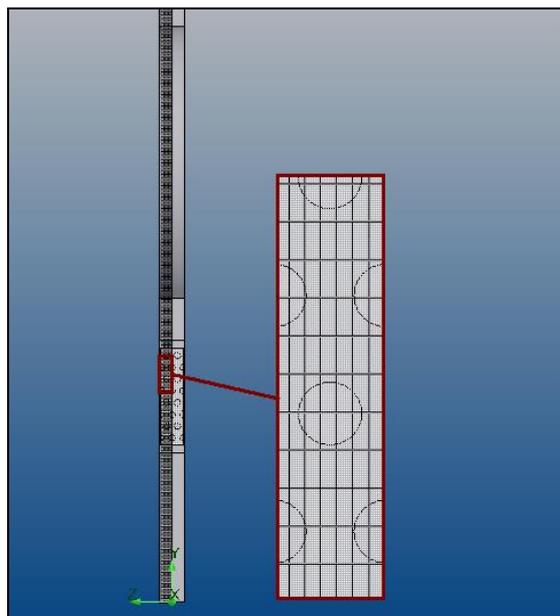


Figura 3.39 Celdas en la malla inicial de los tubos del sistema modificado

Seguidamente se calcula la malla final de sistema modificado y se comprueba que ésta represente al sistema. En la consiguiente figura 3.40, la malla calculada a más de cubrir la totalidad de la geometría también diferencia el número de celdas entre segmentos rectos y segmentos curvos del sistema. Las escalas numéricas que se muestran junto a la malla representan unidades de longitud en metros, lo que evidencia que el tamaño del modelo CAD es una representación fiable del modelo real.

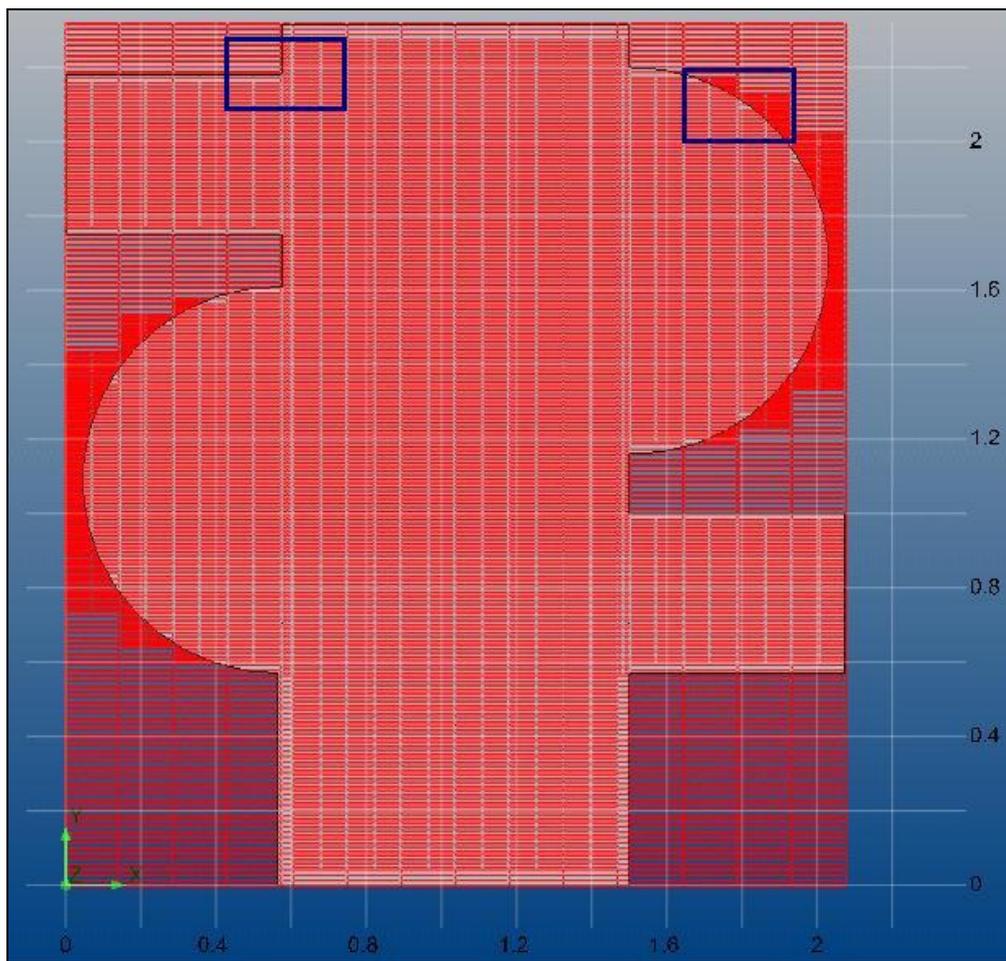


Figura 3.40 Vista frontal de la malla final del sistema modificada.

La figura anterior 3.40 muestra en la parte superior unos dos rectángulos azules, que no pertenecen a las celdas de la malla si no pretenden ser una identificación para comprender la figura 3.41, en la cual se muestra de una manera más amplia como es que existen una cantidad más concentrada de celdas en las zonas curvas y paredes del sistema modificado.

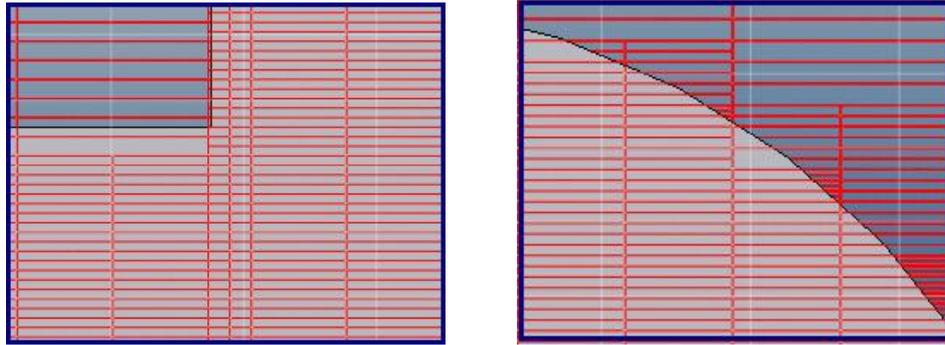


Figura 3.41 Segmentos rectos y curvos de la malla final ajustada.

A continuación, ver figura 3.42, se muestra la manera en la cual están representados las paredes y tubos del sistema por medio de los elementos finitos. El color rojo representa zonas sólidas de material, el color verde representa zonas parciales (una parte sólida y una de fluido) y las de color violeta representan zonas que contenían un borde muy pequeño de material sólido y que fueron remplazadas por celdas completas de fluido.

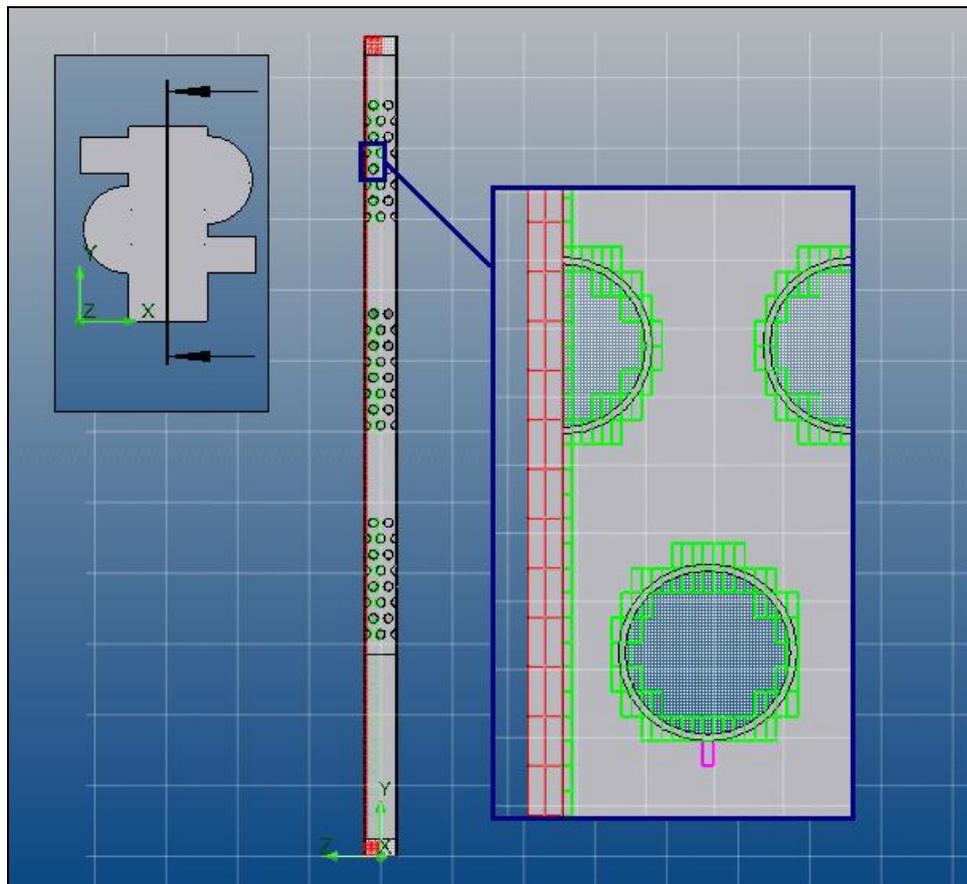


Figura 3.42 Vista detallada de la malla final del sistema modificado.

En la figura anterior las zonas que no están definidas por celdas de colores rojos, verdes o violetas son zonas de fluido que en esta figura no están siendo visualizadas con el fin de apreciar correctamente las zonas de los tubos.

Seguidamente se muestra, ver figura 3.43, una zona del sistema (la misma zona ampliada del detalle de la anterior figura 3.42) en la cual se visualiza todos los elementos que conforman la malla: celdas sólidas que están representadas por el color rojo, las celdas parciales (parte material sólido y parte aire) son de color verde y las celdas de color azul son aquellas que representan el aire presente en el sistema.

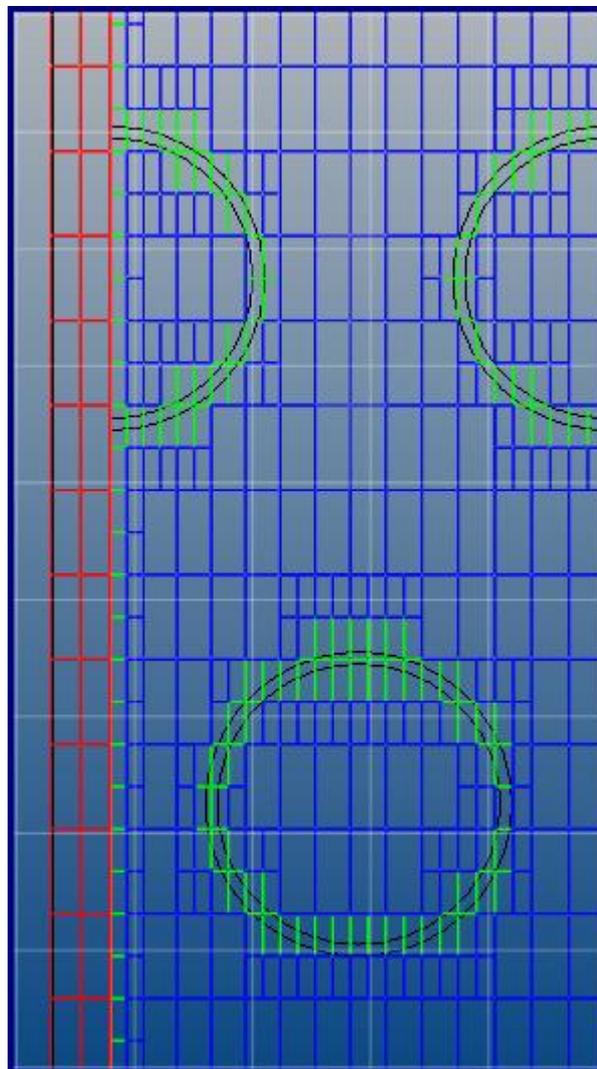


Figura 3.43 Vista ampliada completa de la zona y de las celdas de la malla final del sistema modificado.

De la misma manera que se había revisado antes sobre la diferenciación del tamaño de las celdas para zonas sólidas, para el caso de las celdas de fluido las condiciones son iguales, existen celdas de diferentes tamaños con el fin de mejorar la precisión del cálculo en estas geometrías curvas.

La malla final quedó conformada por:

Número total de celdas: 336404

Celdas de fluido: 114668

Celdas sólidas: 61619

Celdas parciales: 160117

Celdas irregulares: 0

Para la generación de esta malla fue requerido un aproximado de 2 minutos y 500 MB de memoria RAM, lo cual en memoria RAM requerida representa una tercera parte de lo requerido inicialmente.

3.3.10. Corrida de la simulación.

Una vez que se ha terminado de ajustar y calcular la malla final del sistema modificado se procedió a ejecutar el cálculo de la simulación bajo los lineamientos del programa cosmos FloWorks; se requirió un aproximado de 33 horas y 900 MB de memoria RAM. Seguidamente se muestra una imagen de la corrida, ver figura 3.44, mientras esta fue realizada donde se aprecia como se realiza el seguimiento al estado de cálculo de la simulación, ya que se observa como están evolucionando los parámetros de control, además podemos observar la evolución grafica del comportamiento del aire frío y caliente dentro del intercambiador de calor como varios datos adicionales sobre celdas de la malla y tiempo requerido para el cálculo.

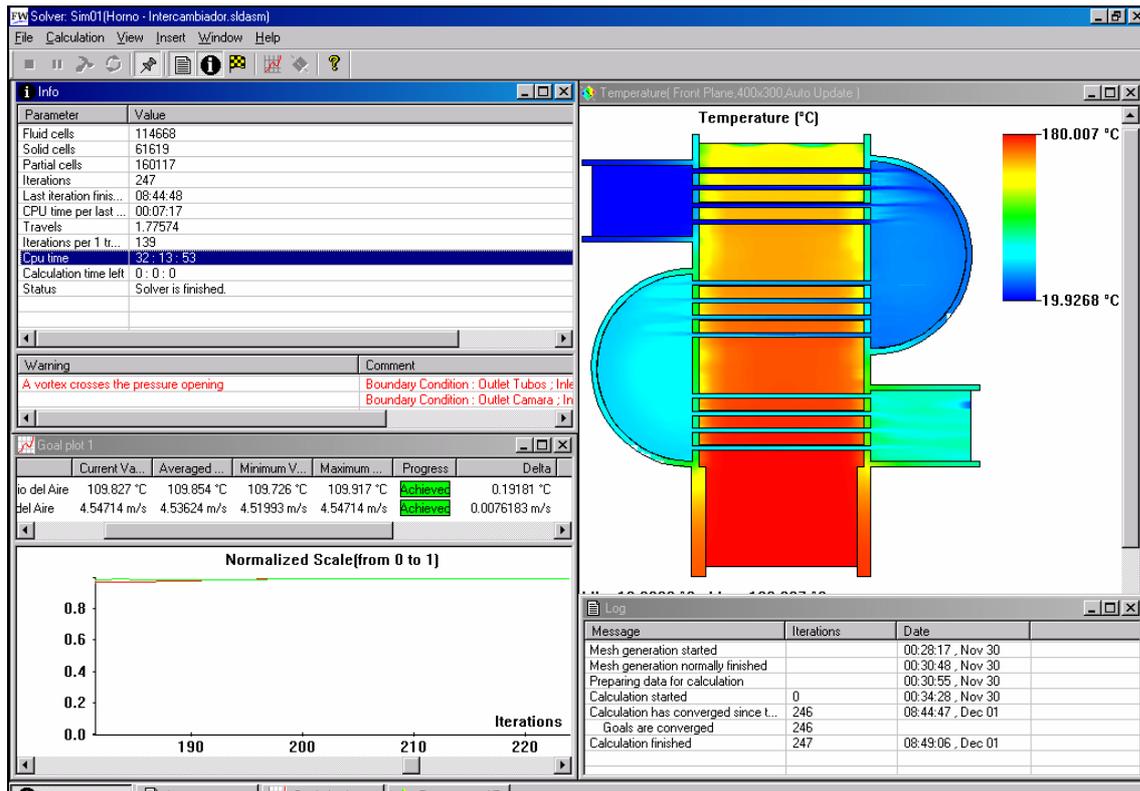


Figura 3.44 Pantalla de Cosmos FloWorks durante el cálculo de la simulación.

3.4. Presentación y análisis de resultados

Una vez que ha concluido el cálculo se procede a visualizar y analizar los resultados:

3.4.1. Temperatura del aire

La temperatura del aire que viaja internamente por los tubos del sistema va aumentando su temperatura a medida que avanza en su recorrido, ver figura 3.45, ingresando a una temperatura de 20[°C] y saliendo del sistema a una temperatura de 75[°C] . Por otra parte el aire que viaja desde la cámara de combustión hacia los tubos que ingresa con una temperatura de 180[°C] y una vez que ha recorrido su trayectoria sale del sistema con una temperatura promedio de 143[°C].

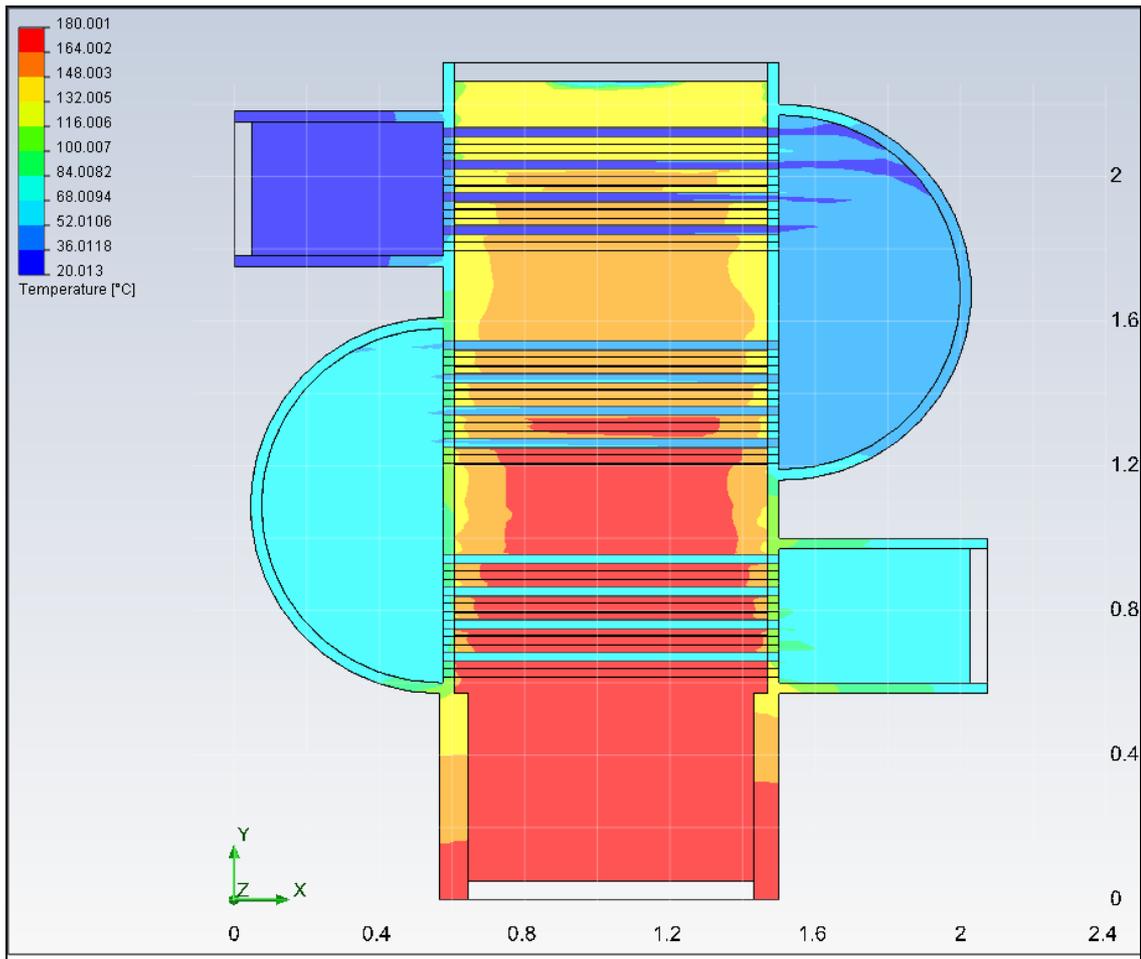


Figura 3.45 Resultados de la simulación – Temperatura del aire

3.4.2. Velocidad del aire

La velocidad de ingreso del aire frío así como la del aire caliente es de 3[m/s], sin embargo cada uno tiene un comportamiento diferente. El aire frío una vez que entra al sistema debe viajar por la parte inferior del tubo lo que implica un incremento considerable de su velocidad, dando finalmente como velocidad promedio de 5 [m/s]. Por otro lado la velocidad del aire frío va disminuyendo a medida que debe viajar entre los tubos, abandonando el sistema a una velocidad promedio de 1 [m/s], esto se muestra en la figura 3.46.

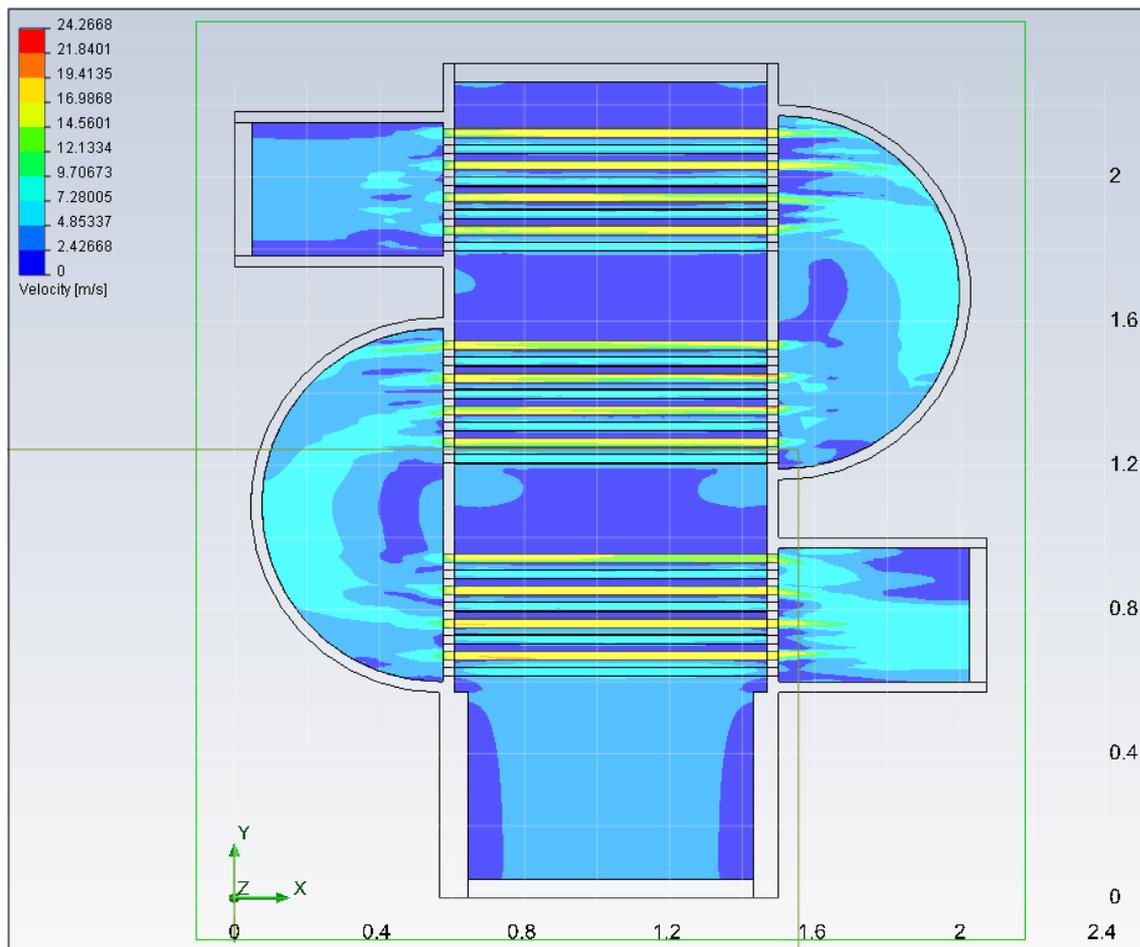


Figura 3.46 Resultados de la simulación – Velocidad del aire

3.4.3. Trayectoria del flujo de aire

Como parte de la simulación también es posible analizar la trayectoria que ha tomado tanto el aire caliente como el aire frío, a continuación se muestra en la figura 3.47 siendo la una sección perpendicular a la dirección de avance del aire por el interior de los tubos y muestra como el aire realiza su recorrido dentro del sistema, y la además se muestra como el aire viaja dentro del sistema en una sección paralela a la dirección de avance del aire por el interior de los tubos. Esta es información permite decidir donde se puede mejorar la geometría para obtener menores caídas en la velocidad tanto del aire caliente como del aire frío.

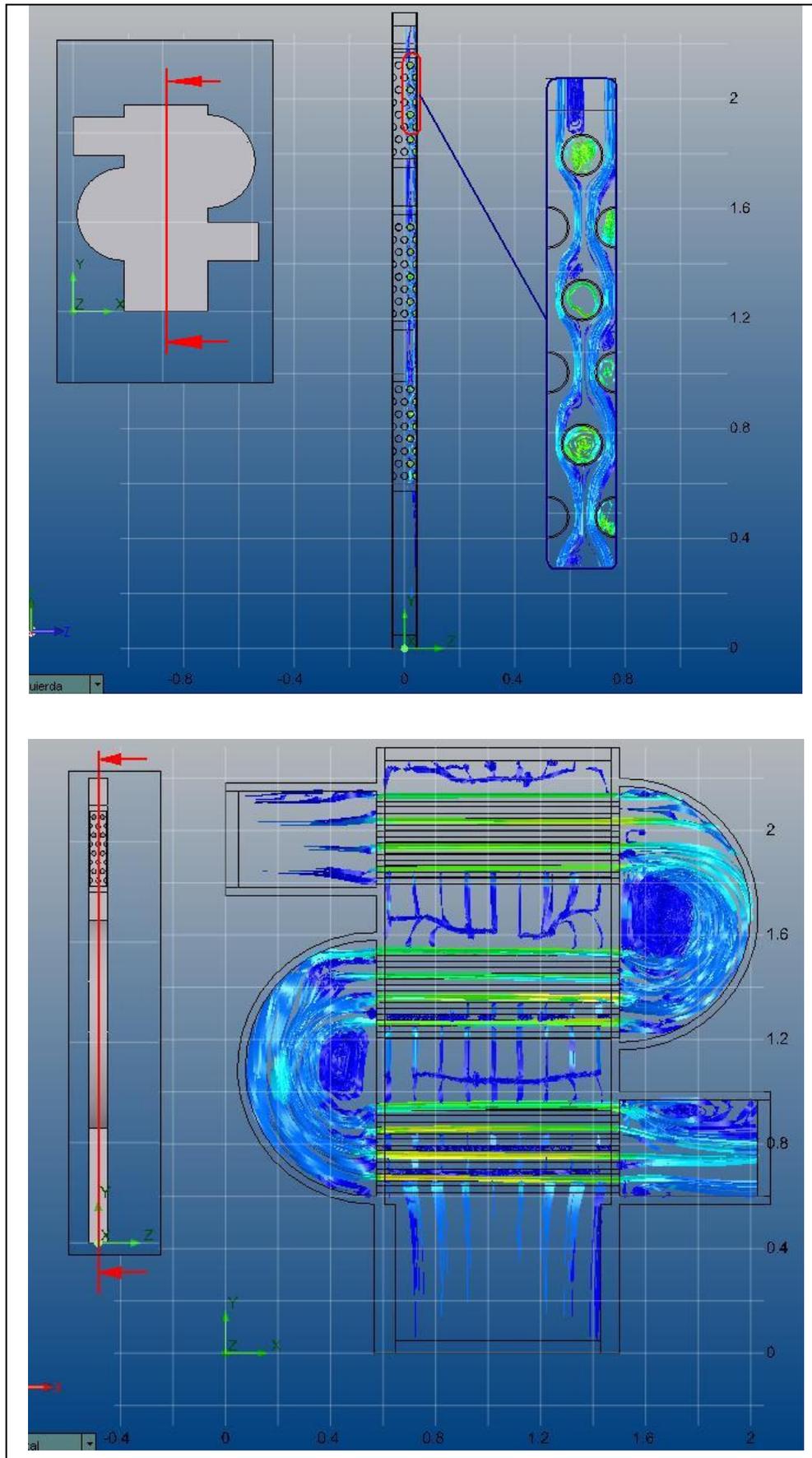


Figura 3.47 Resultados de la simulación – Trayectoria del aire

CAPITULO 4

GUÍA DEL USUARIO DE LA SIMULACIÓN

A continuación se describe la guía para llevar a cabo la simulación térmica del sistema de combustión de biomasa residual en dos programas computacionales llamados Solidworks y Cosmosfloworks y que se ejecutan simultáneamente en un solo ambiente de trabajo (el de Solidworks), se considera que el lector de ésta guía dispone ya del conocimiento básico del manejo de estos dos programas.

Se puede expresar que esta simulación requiere dos etapas, la primera etapa consiste en conseguir una definición completa de la simulación y por otra parte la segunda etapa consiste en ejecutar la simulación y mostrar los resultados obtenidos de la misma; a continuación se describe las 2 etapas.

4.1. Procedimiento de definición de la simulación

En este párrafo se describe el orden de las actividades necesarias para definir una simulación del sistema propuesto.

4.1.1. Modelamiento tridimensional del sistema.

Mediante las diferentes herramientas de un programa CAD, en este caso solidworks, se procede a desarrollar la geometría del sistema procurando no realizar detalles que no sean relevantes para la simulación, como por ejemplo los tornillos de acoplamiento de los diferentes módulos del sistema.

En la gráfica siguiente, figura 4.1, se puede mirar como está desarrollada la geometría inicial de sistema y a continuación se ilustra como queda la geometría una vez que han sido eliminados ciertos detalles no relevantes para la simulación; cabe destacar que no existe una regla escrita sobre que detalles se deben omitir o no en una geometría que será usada para una simulación, sino por el contrario la omisión o no de ciertos detalles quedan a entera decisión del responsable de la simulación.

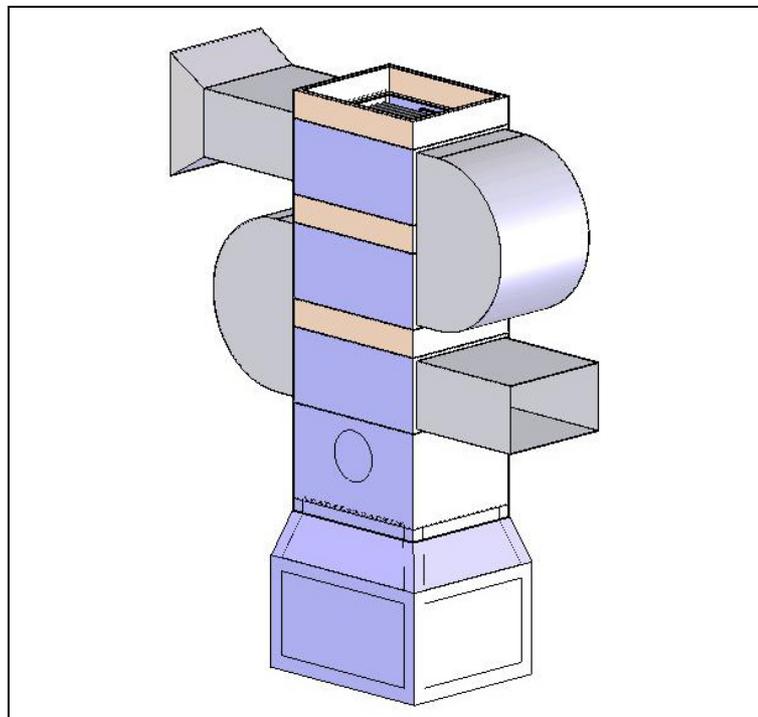


Figura 4.1 Geometría inicial desarrollada para la simulación

En la figura siguiente se muestra como queda el sistema modificado, una vez retirados todos los detalles que no aportan a la obtención de resultados.

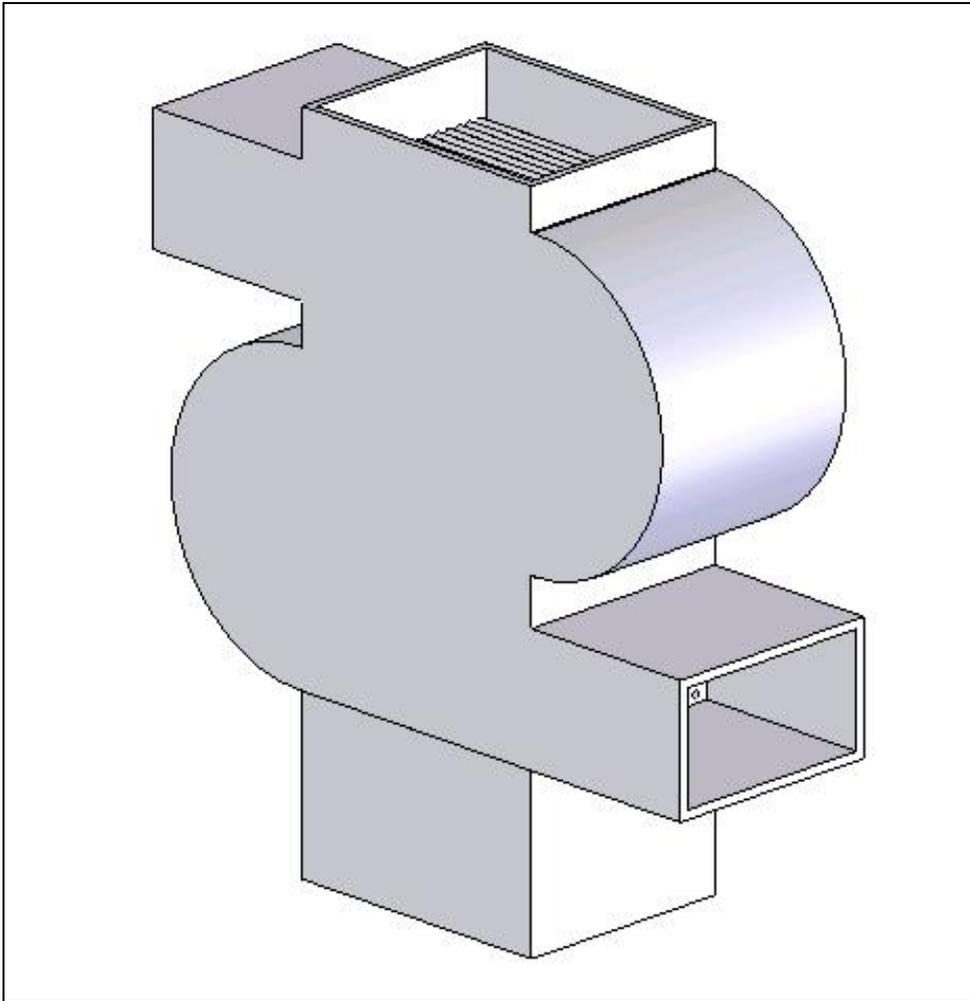


Figura 4.2 Geometría modificada para la simulación

4.1.2. Definición del escenario a simular

Una vez que se ha concebido la geometría de simulación se procede a ejecutar el programa cosmosfloworks dentro del mismo ambiente de trabajo de solidworks, para esto en el menú contextual “Herramientas” del programa solidworks se activa el comando “Complementos...” que muestra la siguiente pantalla y ahí se activa Cosmosfloworks y se da un clic en el botón “aceptar” de esta ventana.

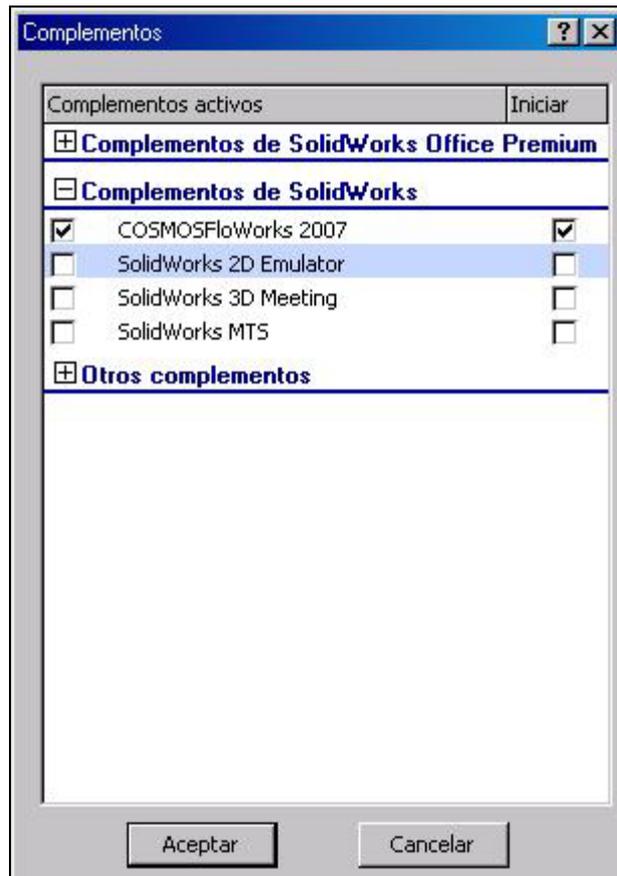


Figura 4.3 Ventana de activación de cosmosfloworks

De esta manera se carga el programa que ejecutará la simulación, muestra de esto es que se incrementa una pestaña en el área de trabajo de solidworks y se agrega un menú desplegable denominado “FloWorks”.

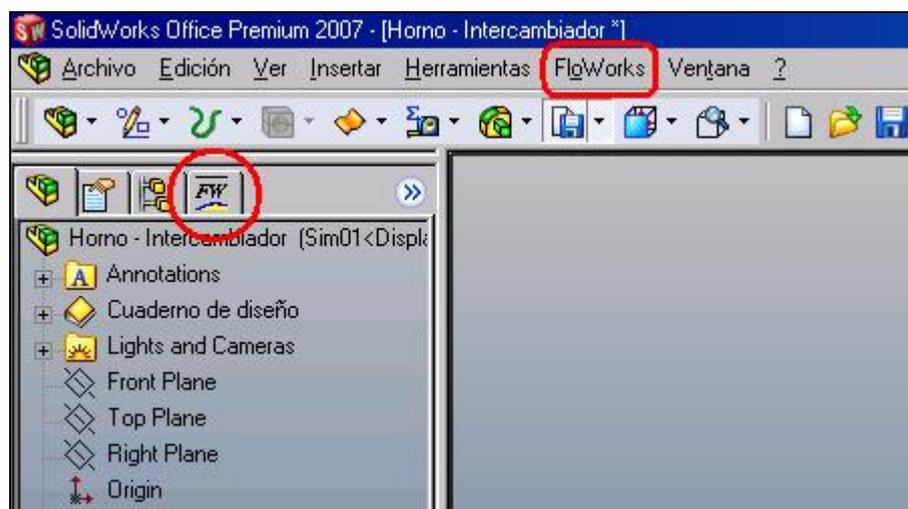


Figura 4.4 Menús de Cosmosfloworks en el área de trabajo de solidworks

Seguidamente se define el escenario a simular que dicho en otros términos se va a realizar la configuración del proyecto; para esto es conveniente el uso del asistente de proyectos que trae el programa cosmosfloworks. Éste asistente se lo encuentra en el menú “FloWorks”, opción “Project” comando “Wizard...”, se lo activa para in iniciar la definición del escenario a simular.

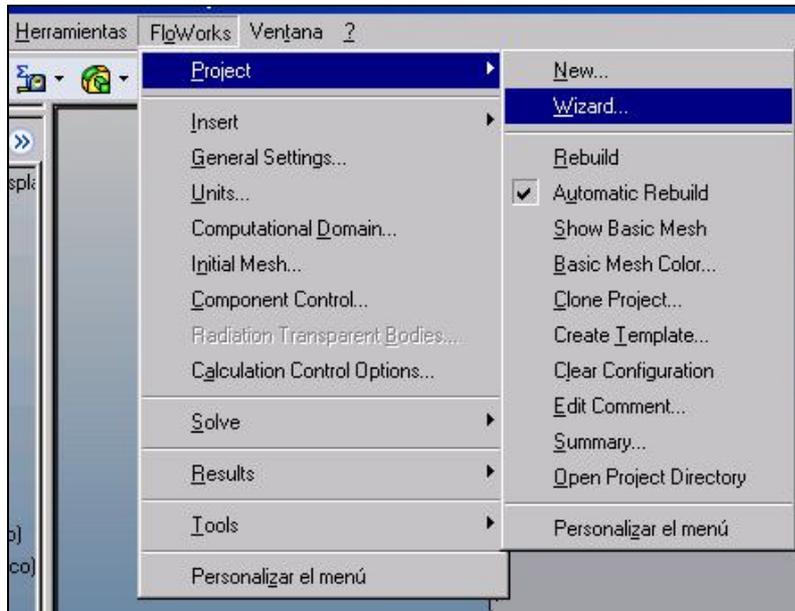


Figura 4.5 Ubicación de asistente de configuración de proyectos

El conjunto de pantallas que trae el asistente deben ser llenadas como se lo indica en el apartado 3.3.1 de este documento.

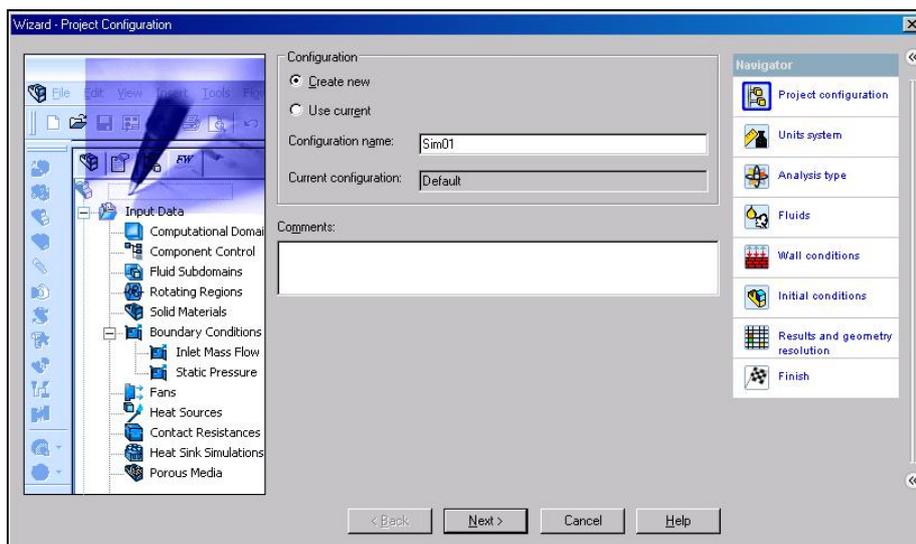


Figura 4.6 Pantalla inicial del asistente de definición del escenario

4.1.3. Condición de simetría.

El uso de un dominio computacional simétrico obedece a la particularidad de este sistema que por su diseño es simétrico a un plano medio longitudinal, un dominio simétrico es clave para la realización de esta simulación debido a que ayuda a reducir los recursos computacionales requeridos.

En la figura que ésta a continuación, figura 4.7, se muestra cual es el plano que parte al sistema en dos partes simétricas, este plano corresponde al plano XY del sistema de coordenadas del programa CAD, y la dirección que se usa como simetría será la del eje Z de valores negativos.

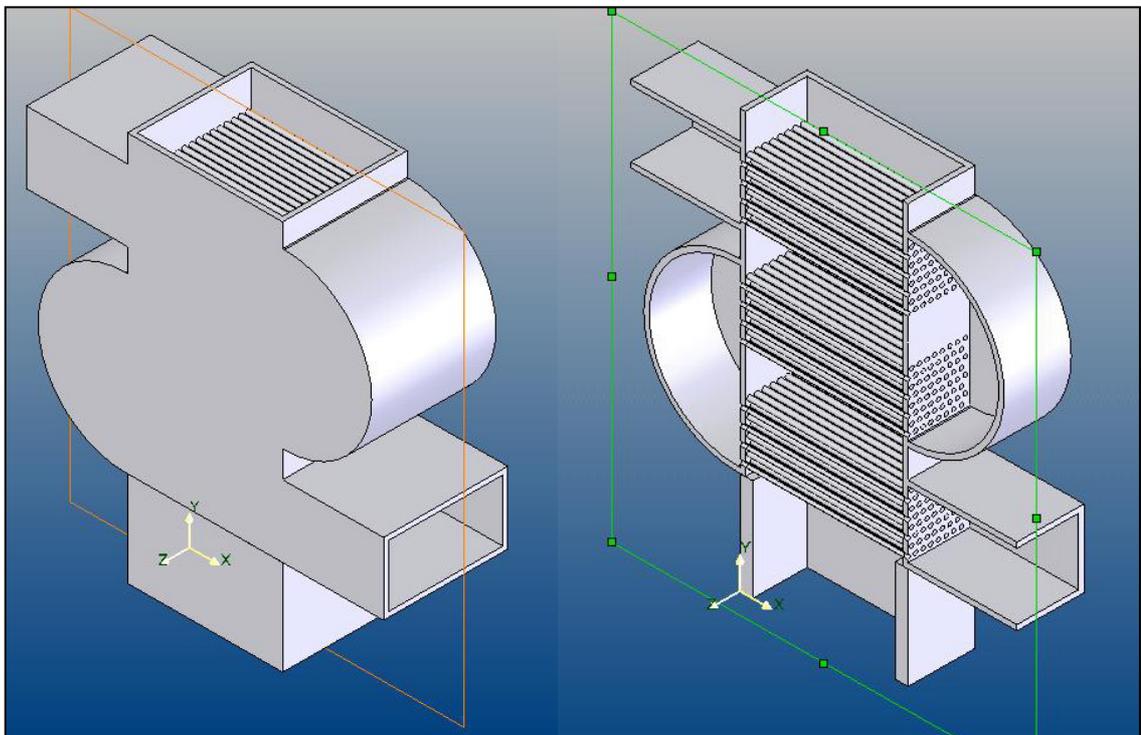


Figura 4.7 Plano de simetría del sistema

Esta simetría es definida en el comando “Computacional Domain...” del menú “FloWorks” y se puede observar en la figura 4.8 como se activa este comando en el software.

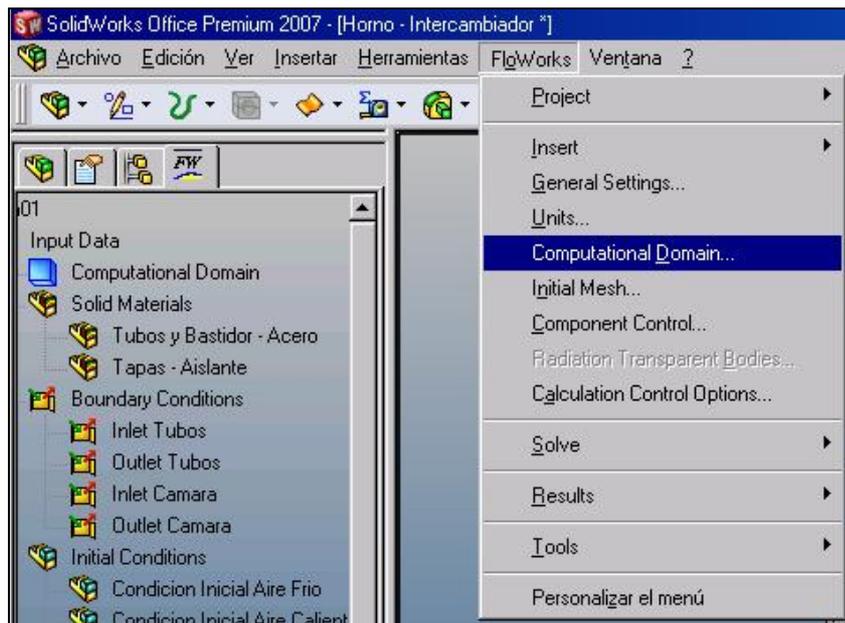


Figura 4.8 Dominio computacional de la simulación

Una vez ejecutado el comando aparece una ventana, en la cual se debe especificar las dimensiones del dominio correspondiente a la mitad del sistema y por otra parte se debe indicar cual es el plano al que se está haciendo referencia la simetría; para el caso de nuestro sistema que esta ubicado el centro del sistema en el origen de coordenadas se debe definir el dominio de la siguiente manera, la coordenada Zmin se coloca el valor de 0 y el resto de coordenadas se mantienen las que por cálculo propio coloca el programa.

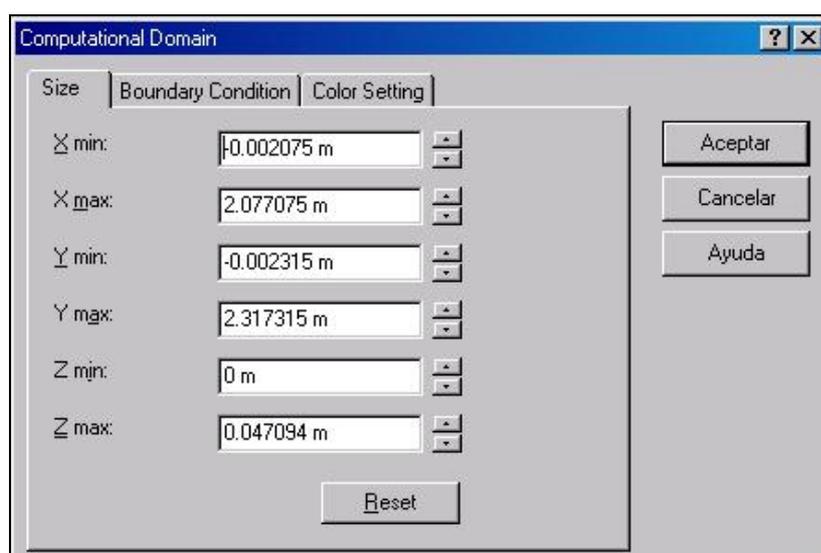


Figura 4.9 Dominio computacional de la simulación - coordenadas

En la pestaña “Boundary condition” en la opción “Z min” se lo define como la dirección al cuál se esta haciendo la referencia de simetría.

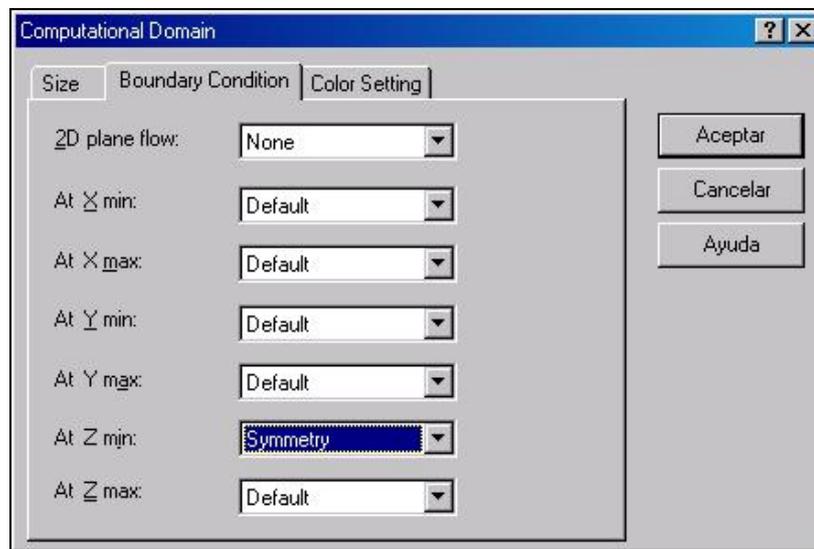


Figura 4.10 Dominio computacional de la simulación – dirección de simetría

4.1.4. Condiciones iniciales de los fluidos

Se agregan condiciones iniciales a los fluidos que interactúan en el sistema con el fin de reducir el tiempo de simulación requerido, esto debido a que una vez definida una condición inicial en uno de los fluidos, todo el volumen de éste tomará estas condiciones establecidas cuando se inicie el cálculo de la simulación.

Se establecen dos condiciones de fluido para nuestro sistema; el primero para el aire frío que ingresa de manera lateral al sistema y viaja por el interior de los tubos y la segunda condición es establecida para el aire que sale de la cámara de combustión y viaja hacia arriba por entre los tubos con el fin de transferir el calor al aire que está viajando por dentro de los tubos.

Para agregar estas condiciones a la simulación se utiliza el comando “Initial Condition...” del menú “Flowworks” opción “Insert”.

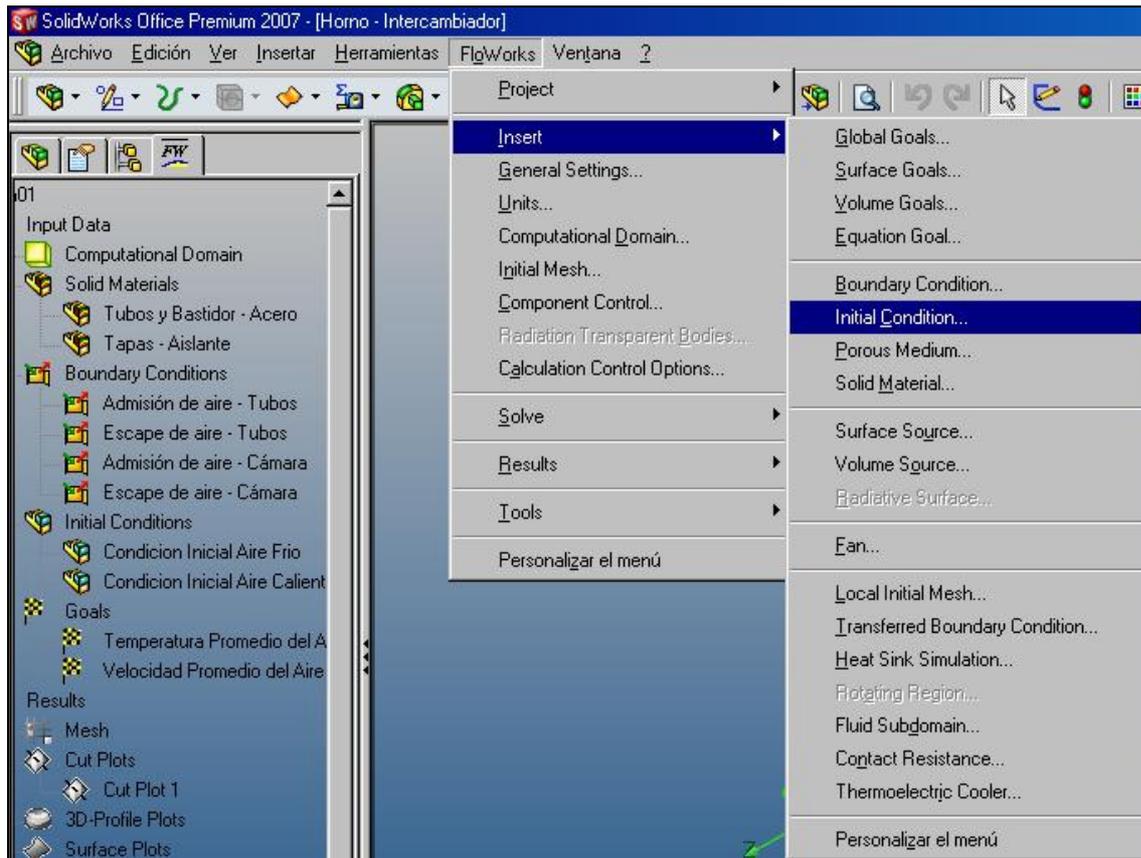


Figura 4.11 Ingreso de condiciones iniciales de fluidos en la simulación

Es importante tener claro que estas condiciones iniciales que se define a un fluido son de carácter instantáneo, es decir que una vez que ha iniciado la simulación las condiciones de los fluidos empiezan a cambiar de acuerdo los fluidos interactúan entre si y con el resto de componentes del sistema.

Una vez que se activa el comando “Initial Condition...” aparecen las opciones de configuración en las cuales se define la condición inicial para el aire frío que ingresa al sistema. Se debe seleccionar una cara que esté en contacto con el volumen al cuál se esta especificando una condición particular para el inicio del cálculo; ésta condición requiere que se especifique parámetros del flujo, es decir la velocidad y dirección del flujo así como de su temperatura y presión.

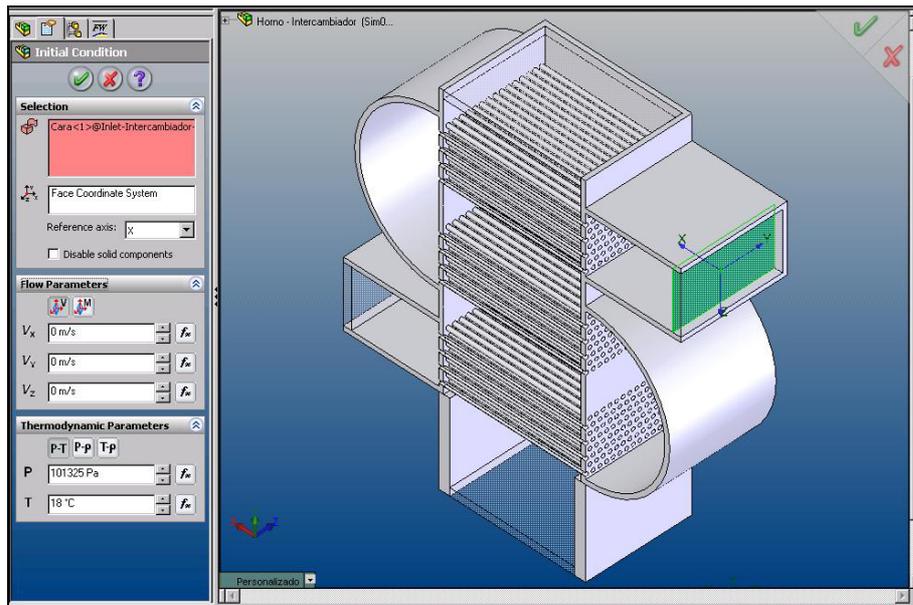


Figura 4.12 Definición de condición inicial de aire frío del sistema

A continuación se define la condición inicial para el aire caliente que sale de la cámara de combustión y viajará por entre los tubos del sistema para abandonar éste por la parte superior del sistema; de igual manera que para el caso anterior la primera acción a realizar es seleccionar una cara de la geometría que este en contacto con el volumen del aire al cuál se quiere definir su condición inicial y se debe especificar los parámetros del flujo como su velocidad, presión y temperatura.

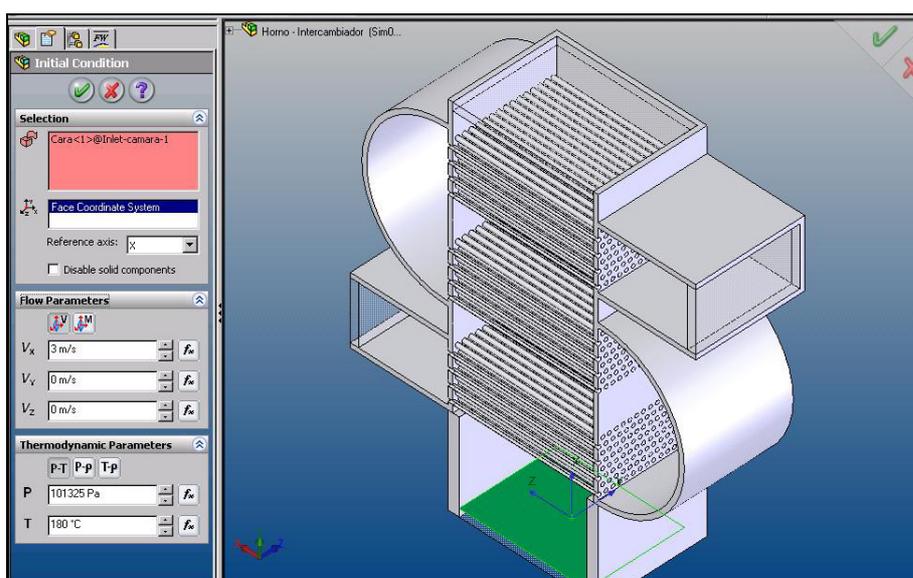


Figura 4.13 Definición de condiciones iniciales del aire caliente.

Una vez terminada esta actividad, estas condiciones quedan registradas en la opción “Initial Conditions” de la simulación como se muestra en la figura. De ser requerido un cambio a estas condiciones se tiene la opción de editar cada una de éstas dando doble clic sobre la condición a reconfigurar.

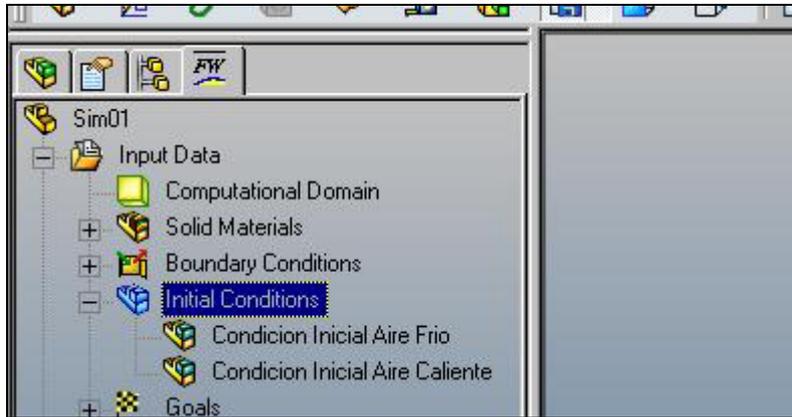


Figura 4.14 Registro de condiciones iniciales de los fluidos.

4.1.5. Condiciones de frontera de los fluidos

Las condiciones de frontera de los fluidos se refiere a las condiciones definidas en las cuales un fluido ingresa al sistema o sale de el; entendiendo a estas condiciones de frontera como parámetros o valores constantes del sistema en el tiempo y que afectan directamente a las condiciones de los fluidos que son parte del sistema.

Para éste sistema en particular se debe definir 4 condiciones de frontera, de las cuáles dos son las condiciones en las cuales ingresa (admisión) el aire al sistema, frío y caliente, y dos son las condiciones de entorno (ambiente) a las que se enfrentan las dos salidas de aire (escape) una vez que abandonan el sistema.

Para ingresar estas condiciones se debe ejecutar el comando “Boundary Condition ..” del menú “FloWorks” opción “Insert”.

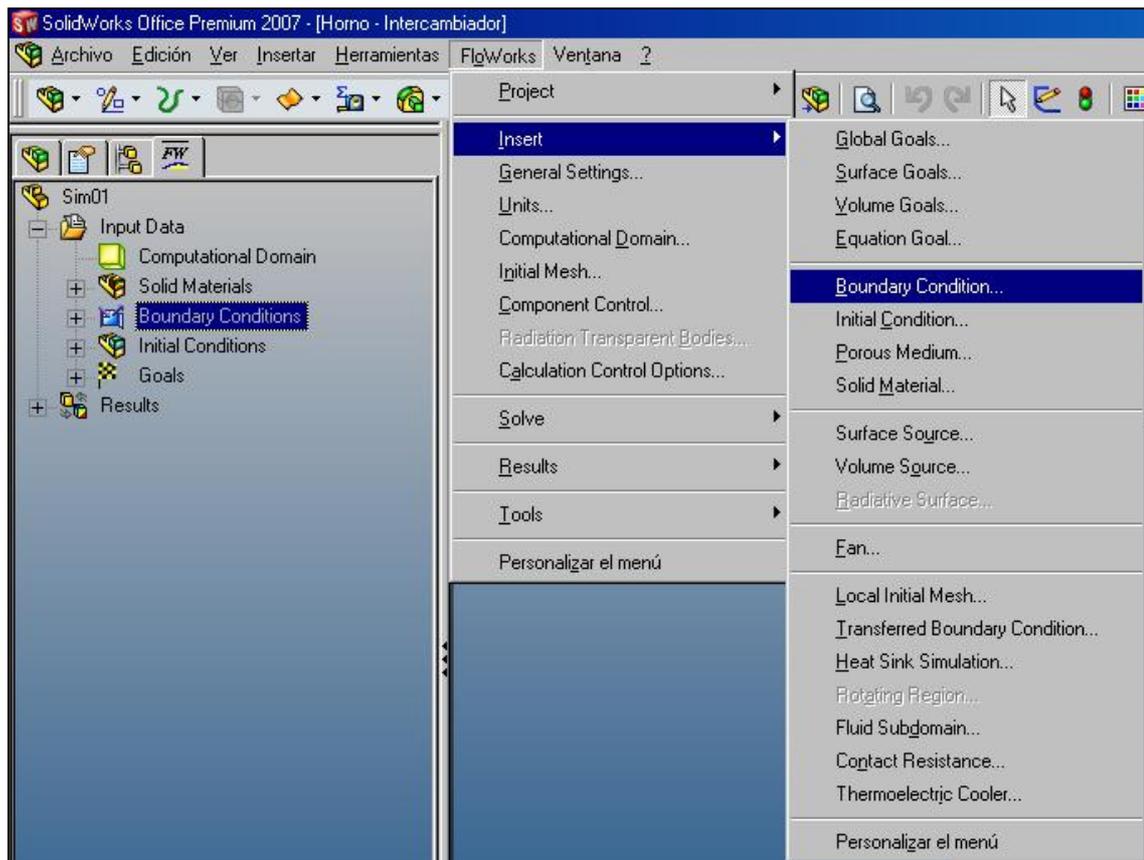


Figura 4.15 Ingreso de las condiciones de frontera en la simulación

Una vez que se ha ejecutado este comando aparecen las opciones de configuración de una condición de frontera, si bien no se requiere de un orden en particular de ingreso de las condiciones de frontera se va a iniciar con las admisiones de aire al sistema y luego definir las características de las salidas de aire (escape).

Se selecciona una cara por la cual el aire ingresará al sistema y se introduce el tipo de condición de frontera en este caso admisión "inlet" y los valores correspondientes a los parámetros del fluido, tales como su velocidad, dirección así como de su temperatura.

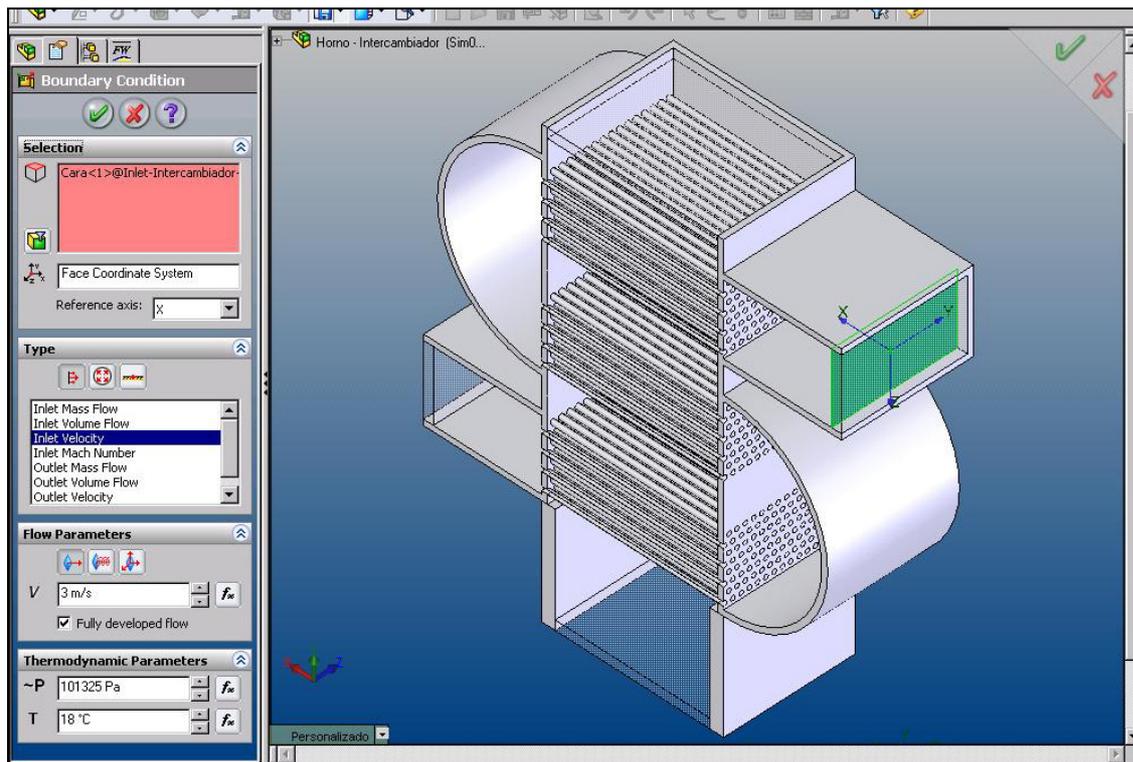


Figura 4.16 Definición de condición de frontera del ingreso del aire frío.

Se vuelve a ejecutar el comando de “Boundary Condition..” se selecciona una cara por la cual ingresará el aire caliente y se introduce al igual que en el caso anterior los parámetros correspondientes al ingreso del aire caliente al intercambiador como es el tipo de condición de frontera, velocidad y dirección del aire así como su presión y temperatura.

En la figura que esta a continuación, figura 4.17, se puede observar una pantalla habitual del software donde uno puede ingresar los datos de velocidad, dirección, presión y temperatura; tomando en cuenta que debe estar señalado la opción de Inlet velocity en el recuadro Type.

Una vez ingresada toda ésta información se procede a hacer clic sobre el botón redondo superior izquierdo que contiene una marca de un visto verde, y de esta manera concluye este proceso de ingreso de condiciones de frontera del aire caliente.

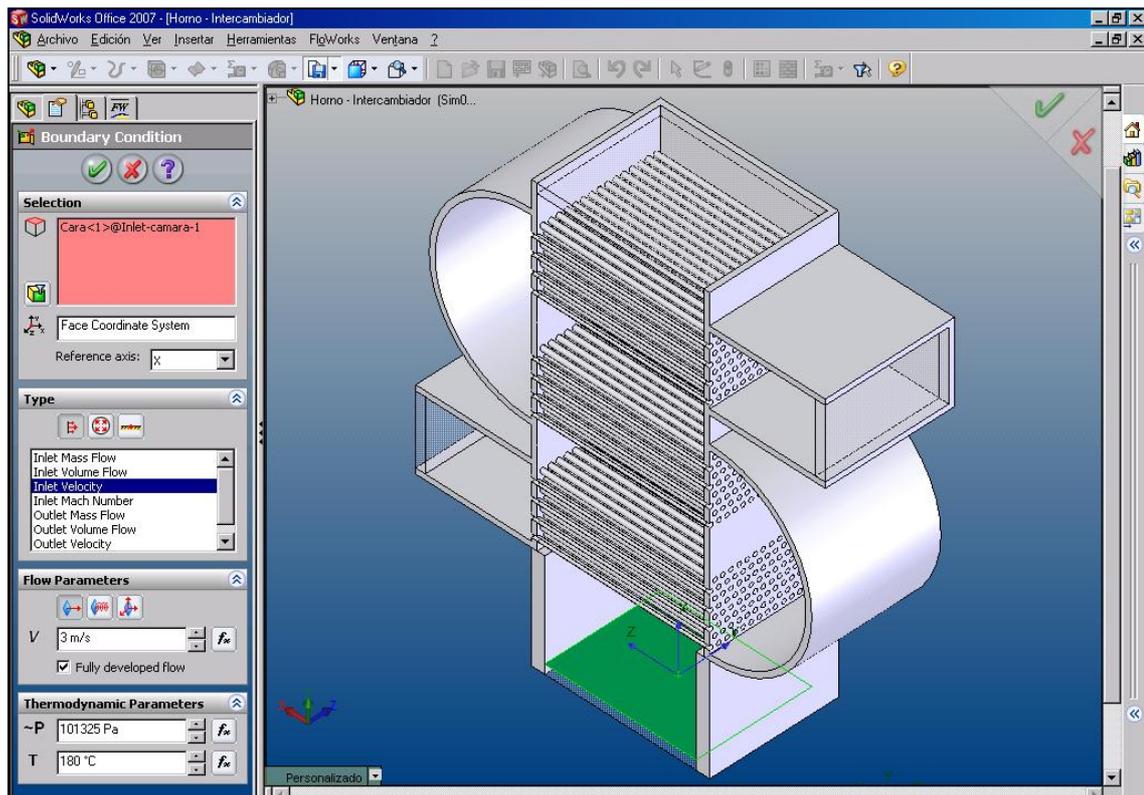


Figura 4.17 Definición de condición de frontera del ingreso del aire caliente.

Finalmente se ejecuta una vez más el comando “Boundary Condition..” para definir los escapes (salidas) de aire que presenta el sistema, para este sistema se tiene 2 escapes, el primero es el que se encuentra en la parte superior del y es por el cuál se desfoga el aire denominado “caliente” mismo que pierde temperatura al pasar por entre los tubos del sistema y por otra parte se tiene el escape inferior lateral, por el cuál sale el aire “frío” el cual ha ganado la temperatura al pasar por el interior de los tubos. Para ambos casos se ingresa la información correspondiente al tipo de condición de frontera seleccionando de antemano caras por las cuales el aire abandonará el sistema, que para los escapes es la opción “environment pressure”, además se verifica los valores de presión y temperatura

La figura 4.18 muestra la manera como se ha de ingresar los datos correspondientes así como están seleccionadas las caras por donde tanto el aire caliente como el frío abandonan el sistema.

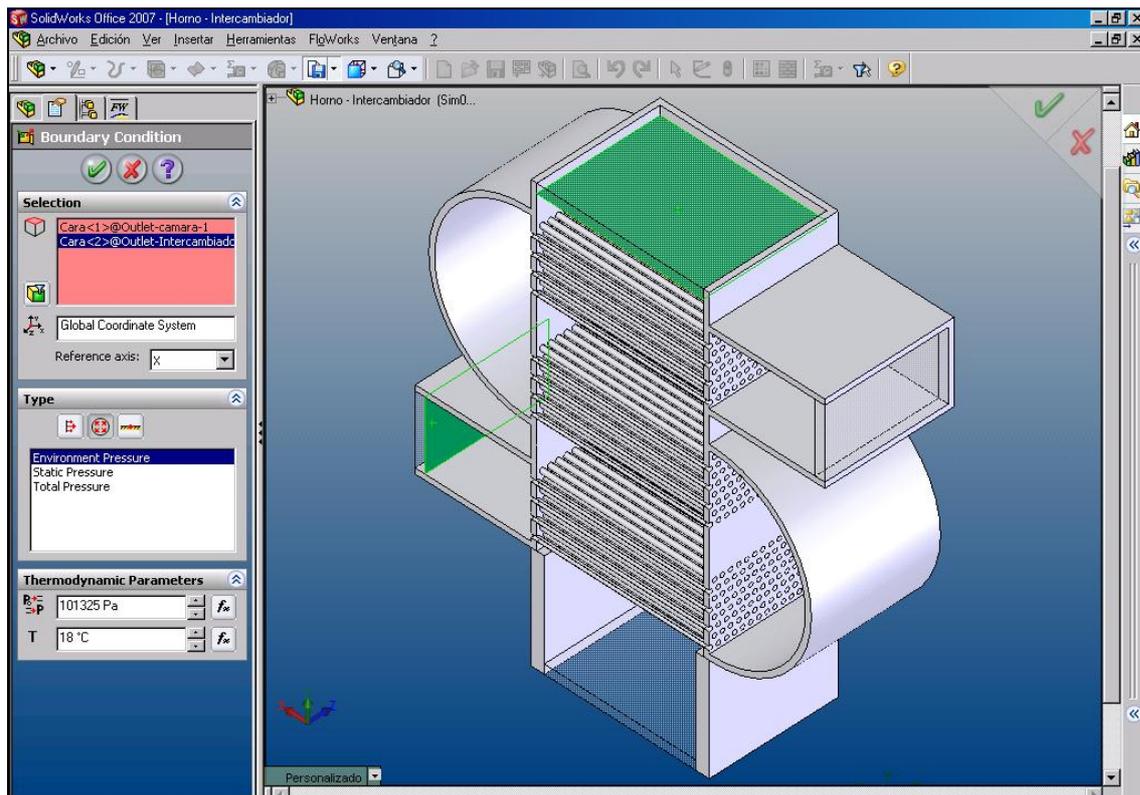


Figura 4.18 Definición de condición de frontera de la salida del aire.

4.1.6. Especificación de materiales

El seleccionar el material del cuál esta hecho el sistema se lo debe realizar ejecutando el comando “Solid Material...” del menú “FloWorks” la opción “insert”

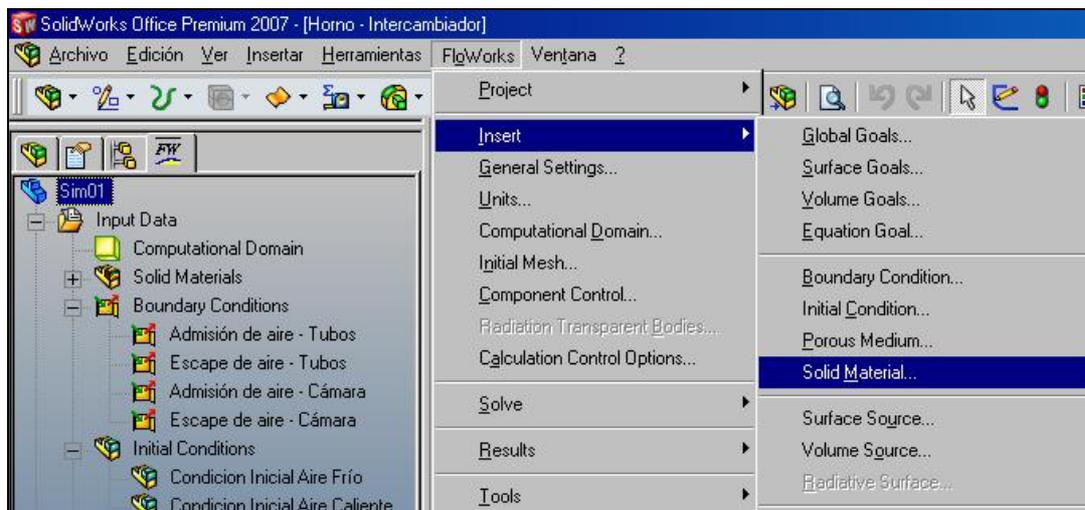


Figura 4.19 Definición del material del sistema.

Como la estructura es de acero se selecciona toda la geometría y se define como material al acero en el recuadro denominado “solid”

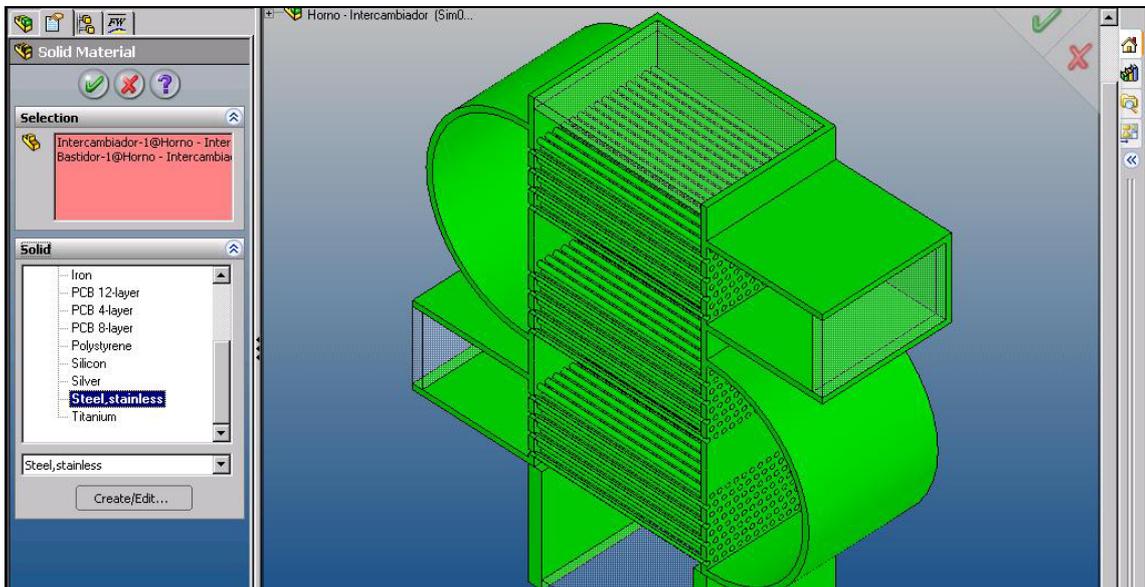


Figura 4.20 Definición del material de los componentes del sistema.

Se ejecuta una vez más el comando “Solid Material...” del menú “Floworks” para definir como Aislante el tipo de material del cuál están hechas las caras que se seleccionó como admisiones y escapes de aire.

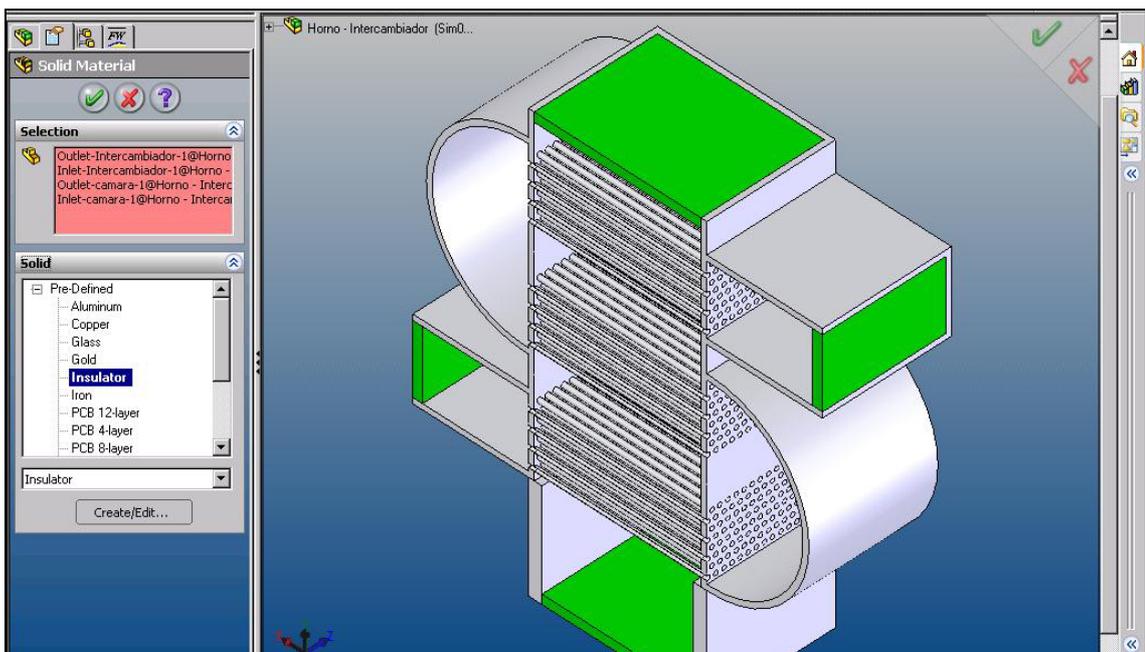


Figura 4.21 Definición del material de los escapes y admisiones

4.1.7. Parámetros de control en la solución de la simulación

Al definir los parámetros de control de la simulación lo que se pretende es poder obtener los datos de cierto parámetro y su comportamiento dentro del sistema, y además a estos objetivos se los puede definir o no como variables de control para el control de la finalización de la simulación. Para poder ingresar objetivos en el análisis se debe ejecutar el comando “Global Surface...” del menú “FloWorks” en la opción “Insert”

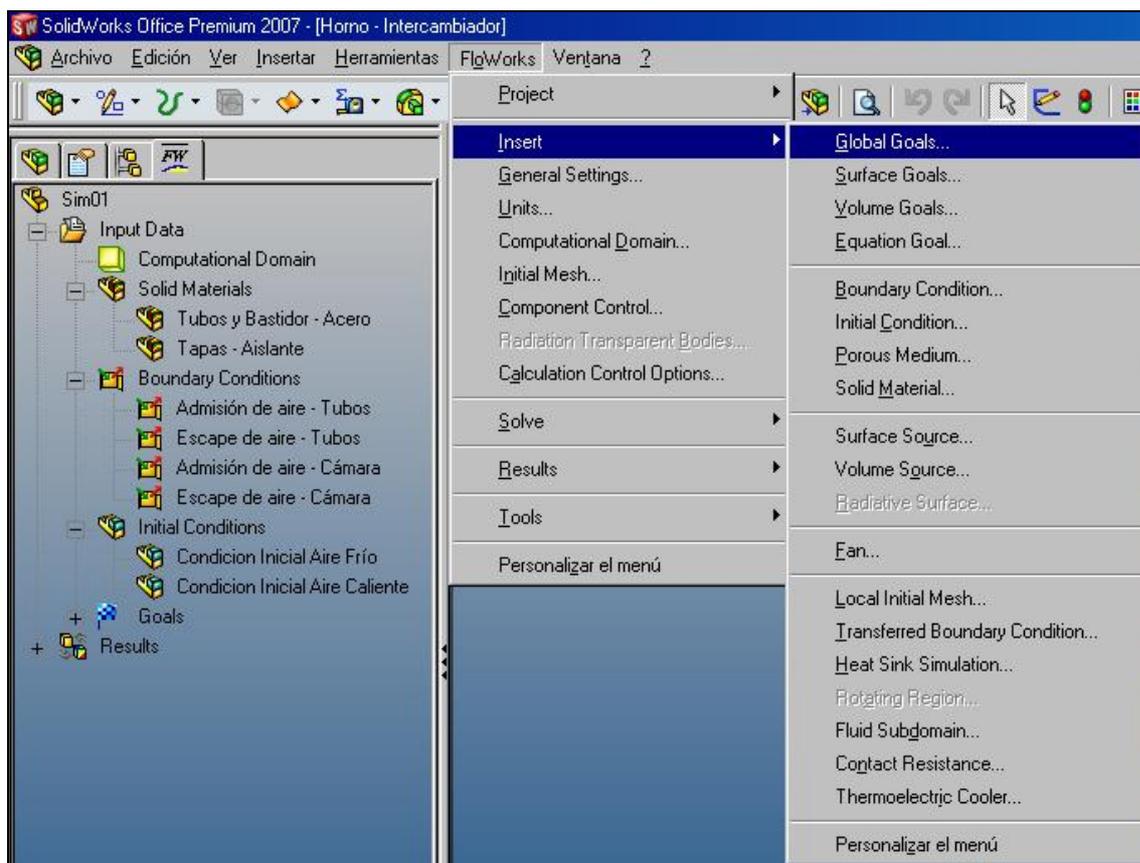


Figura 4.22 Especificación de los objetivos de la simulación.

Aparece una ventana donde se debe señalar los objetivos que se han considerado conocer su comportamiento dentro del sistema. Para este caso en particular se tiene interés en conocer como es el comportamiento general de la temperatura de las dos rutas del aire, por otro lado es conveniente agregar a la velocidad como otro objetivo de control de la simulación para evitar que la simulación finalice sin que el aire haya estabilizado su movimiento dentro de todo el sistema

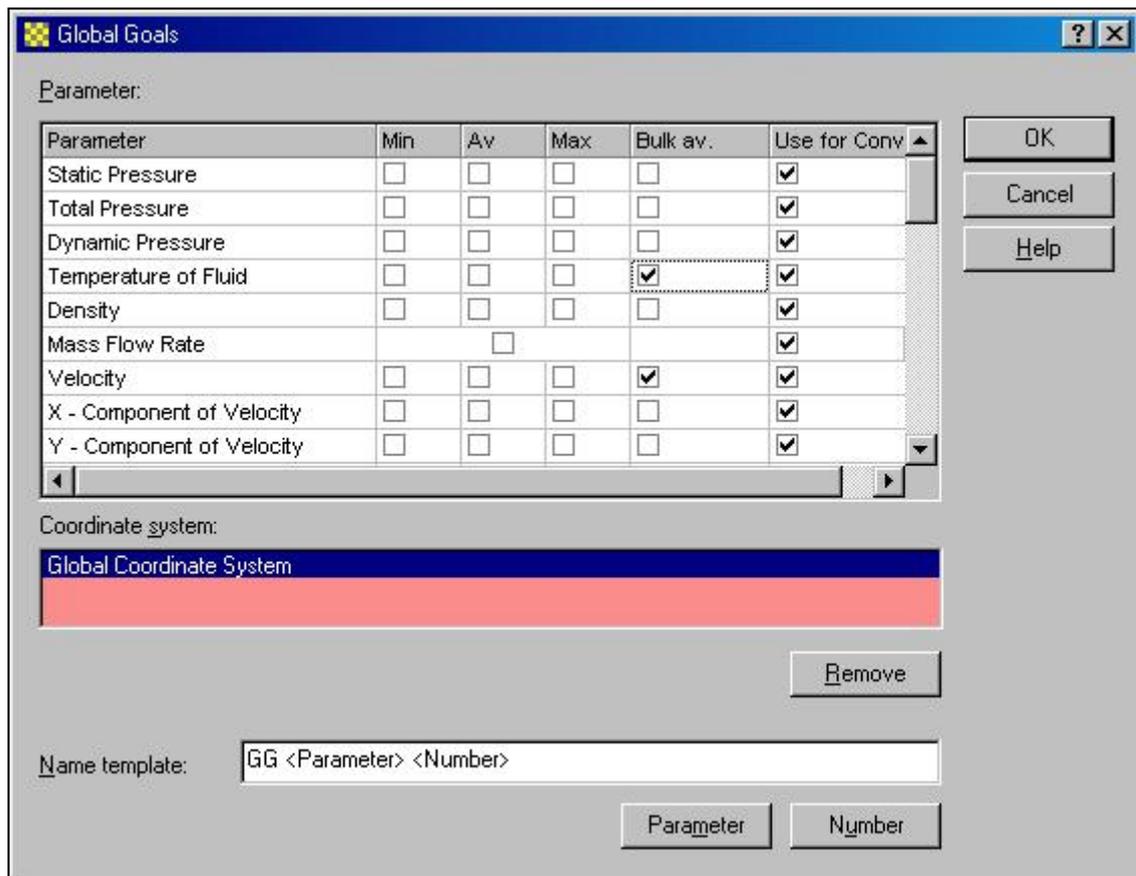


Figura 4.23 Selección de los objetivos de la simulación.

Una vez que se acepta esta pantalla (Figura 4.23) los objetivos quedan definidos.

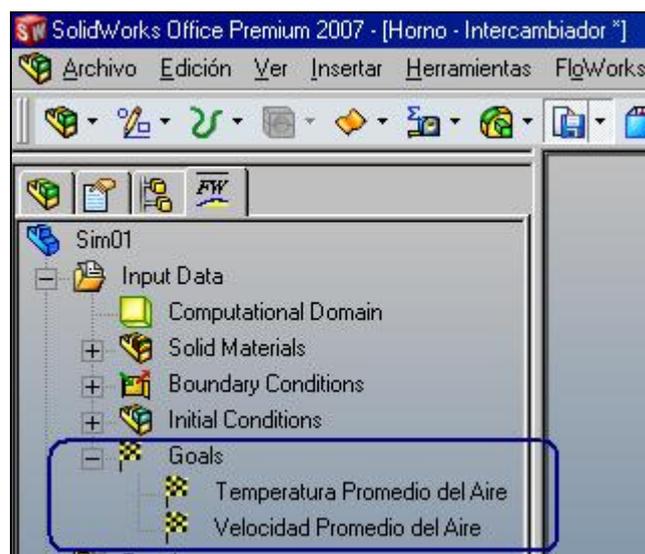


Figura 4.24 Visualización de los objetivos de la simulación.

4.1.8. Parámetros de malla

Para acceder ha esta configuración de malla se debe ingresar al comando “Initial Mesh...” del menú “Flowworks”.

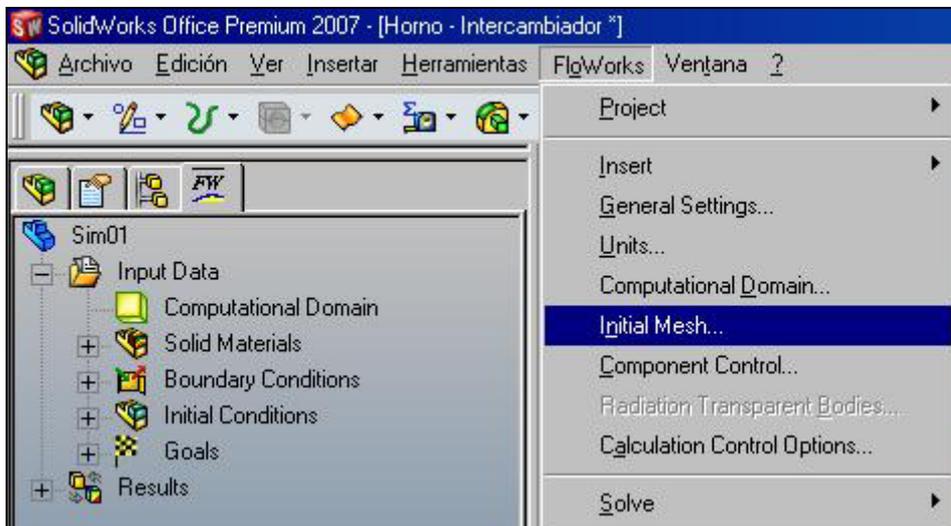


Figura 4.25 Acceso a los parámetros de la malla

Debido a la existencia de espesores delgados en los componentes del sistema es conveniente activar la opción de paredes delgadas en la malla.

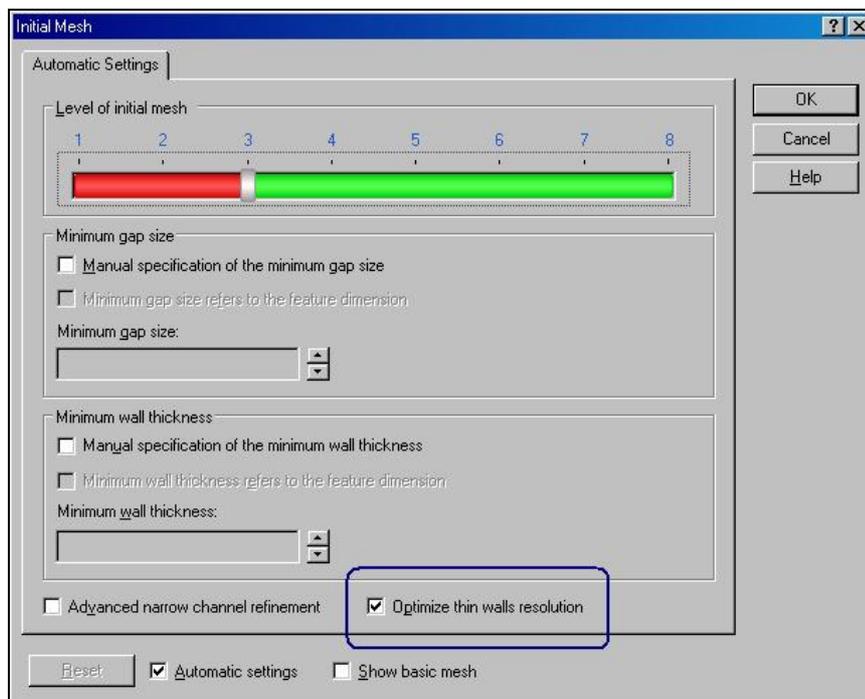


Figura 4.26 Activación de opción de paredes delgadas en la malla inicial

4.1.9. Inicio de la simulación

Una vez que se tiene definido el escenario en el cual se ejecuta la simulación, figura 4.27, se ejecuta el cálculo de la malla.



Figura 4.27 Escenario definido para la simulación.

Se ejecuta el calculo de la malla a través del comando “Run..” del menú “FloWorks” opción “Solve”.

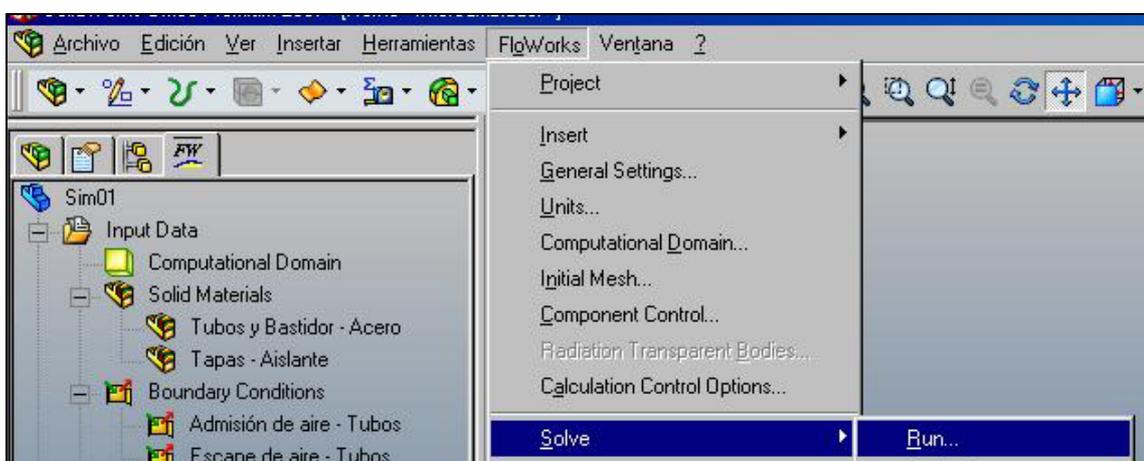


Figura 4.28 Acceso al cálculo de la malla.

Una vez activado este comando aparece la pantalla en la cuál se debe seleccionar la opción “Create mesh” y además inhabilitar la opción “Solver” como se muestra en la siguiente figura y presionar el botón “Run”.

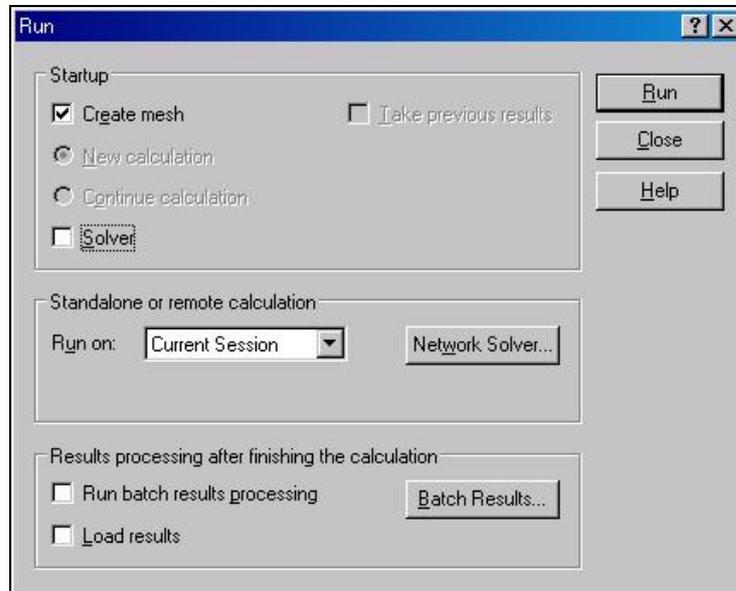


Figura 4.29 Ejecución del cálculo de la malla.

Aparece la pantalla del “solver” de del programa FloWorks y se calcula la malla.

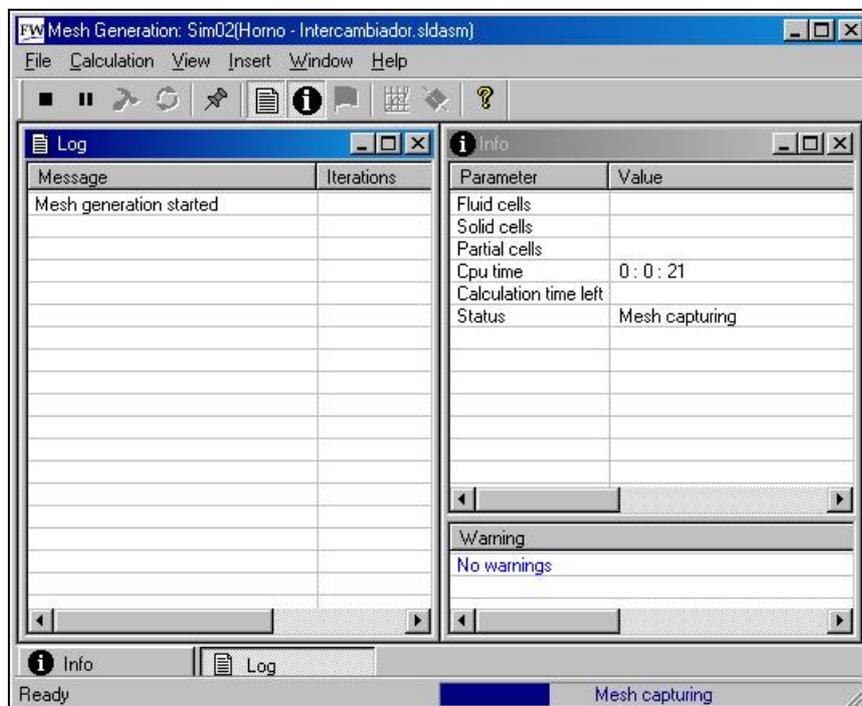


Figura 4.30 Ejecución del cálculo de la malla.

Una vez finalizado este cálculo se procede a cargar los resultados, ejecutando el comando “Load/Unload Results” del menú “FloWorks” opción “Results”

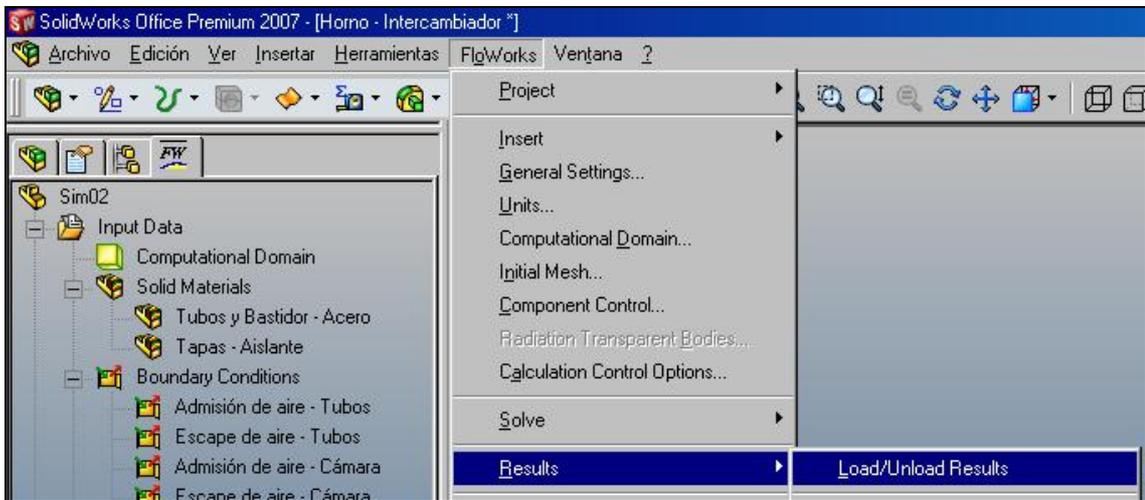


Figura 4.31 Ejecución del comando - Cargar de resultados.

Surge una ventana donde se debe seleccionar el tipo de resultado que se quiere cargar, teniendo dos opciones, el archivo de extensión “.fld “ el cuál contiene toda la información de la simulación y el archivo “ r_000000.fld ” el cuál contiene únicamente la malla inicial de sistema, en esta parte de la simulación escoger cualquiera de los 2 archivos no tiene ninguna implicación ya que solo se ha calculado la malla inicial.

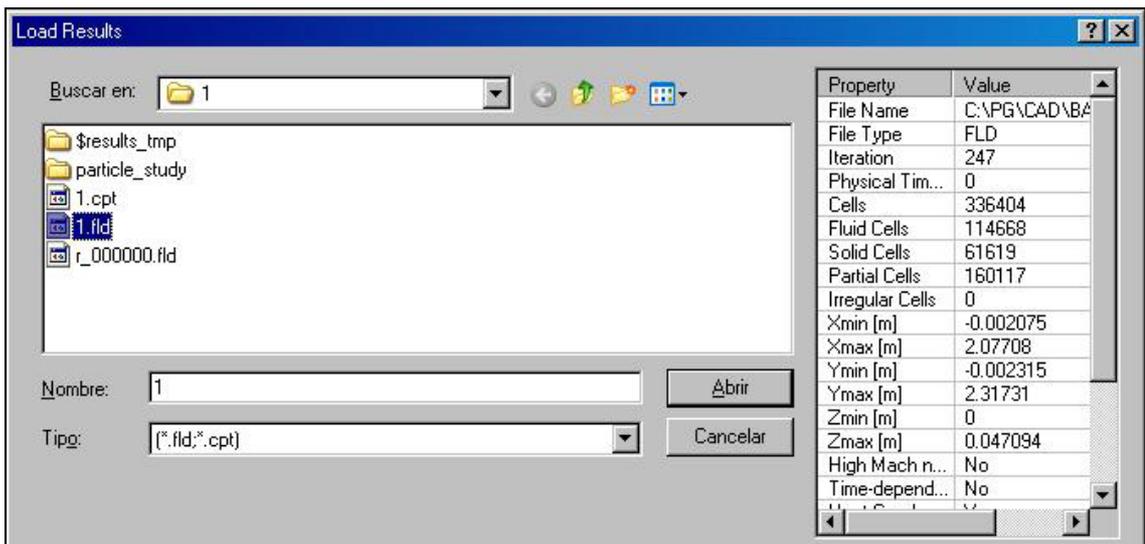


Figura 4.32 Ejecución del comando – Selección de tipo de resultados a cargar.

Se da un clic con el botón secundario del ratón sobre “Mesh” del árbol de resultados y se selecciona “3D View...”

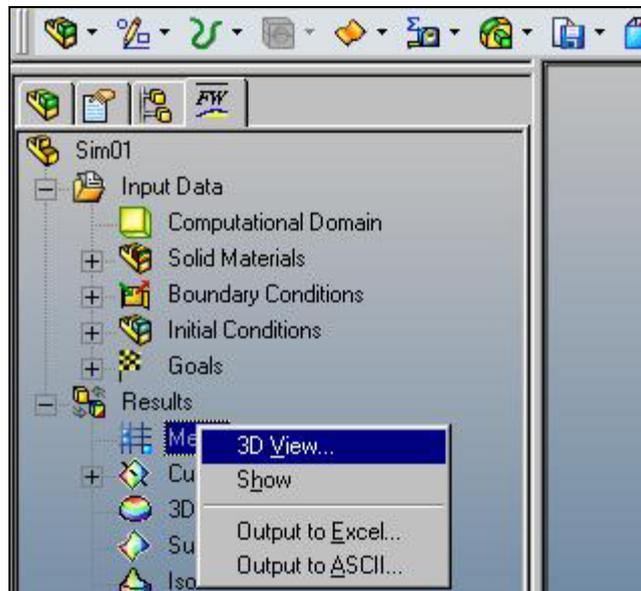


Figura 4.33 Ejecución del comando – Visualización de la malla en 3D.

En la pantalla mostrada a continuación se debe colocar “All” en la columna de “Value” en todos los parámetros con excepción de “Fluid cells”, se usará la totalidad del volumen del sistema por eso no se cambiará nada en “Region”.

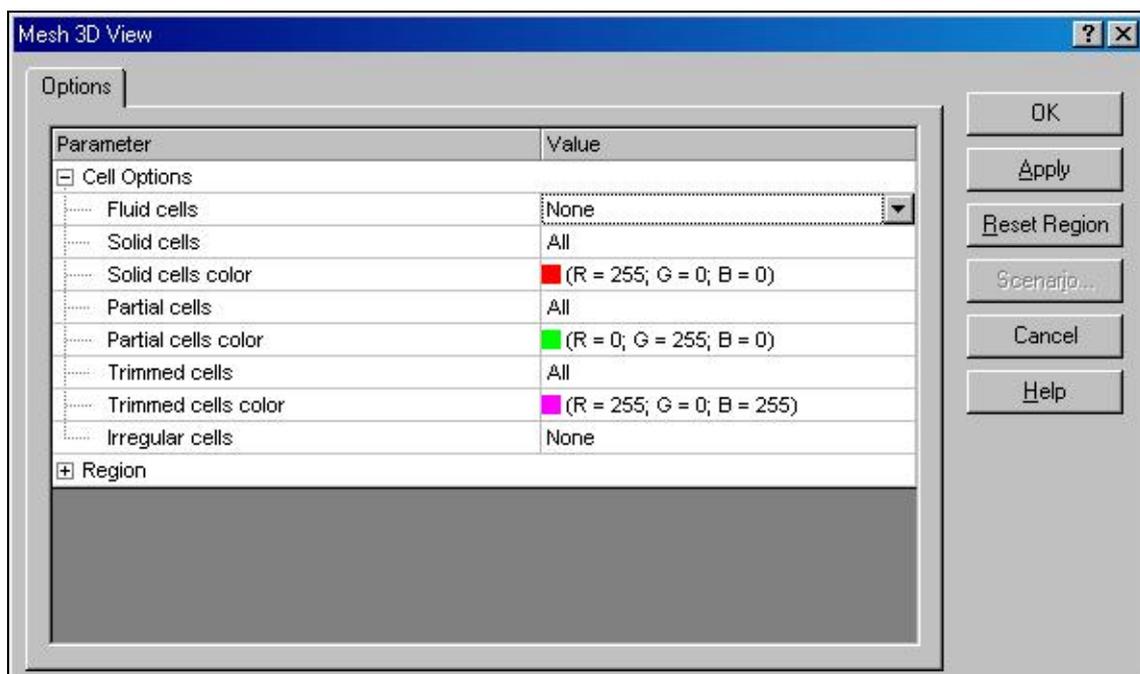


Figura 4.34 Opciones de visualización de la malla.

Al aceptar esta ventana seguidamente se observa como esta definida la malla.

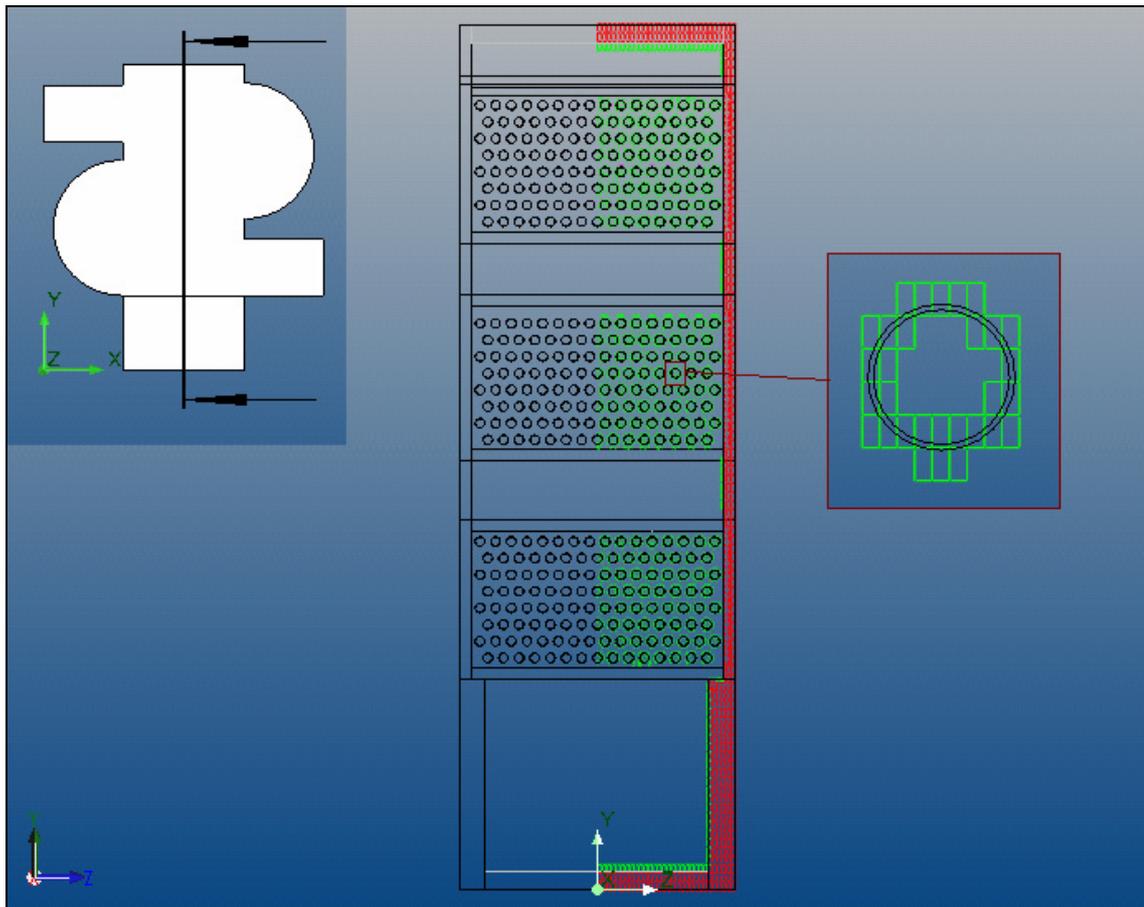


Figura 4.35 Visualización de la malla del sistema.

En esta etapa es importante evaluar cual fue la cantidad de memoria RAM del computador requerida y el tiempo tomado en éste cálculo de la malla, ya que estos son parámetros que deben ser considerados en los ajustes sobre la geometría y malla de la simulación.

4.1.10. Ajustes a la simulación – geometría y malla modificada

Para éste sistema y de acuerdo a los recursos computacionales disponibles para el cálculo se requiere la realización de ajustes a la geometría y a la malla del sistema para mejorar la precisión de los resultados obtenidos en la simulación.

En la figura mostrada a continuación se observa como se ha cambiado la geometría inicial por una proporción representativa de esta.

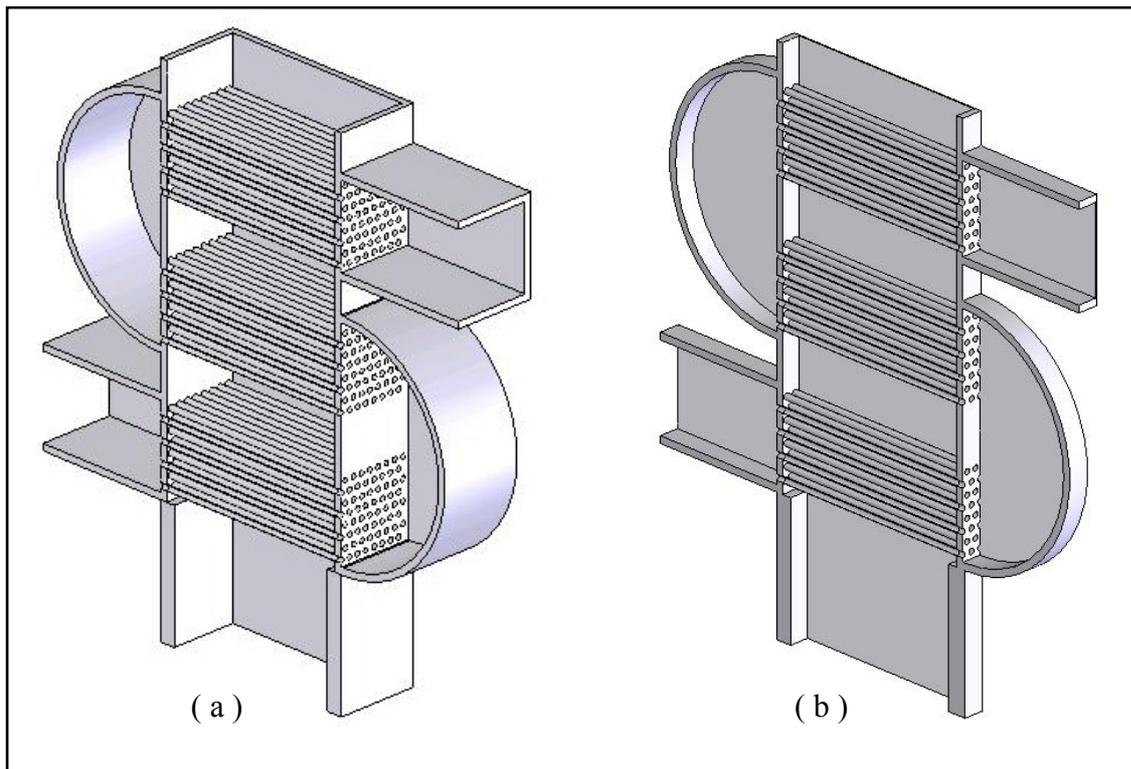


Figura 4.36 Geometría del sistema: a) Inicial, b) Final.

Además se cambia el valor de los parámetros de la malla inicial, para eso se ingresa nuevamente “Initial Mesh...” del menú “FloWorks”.

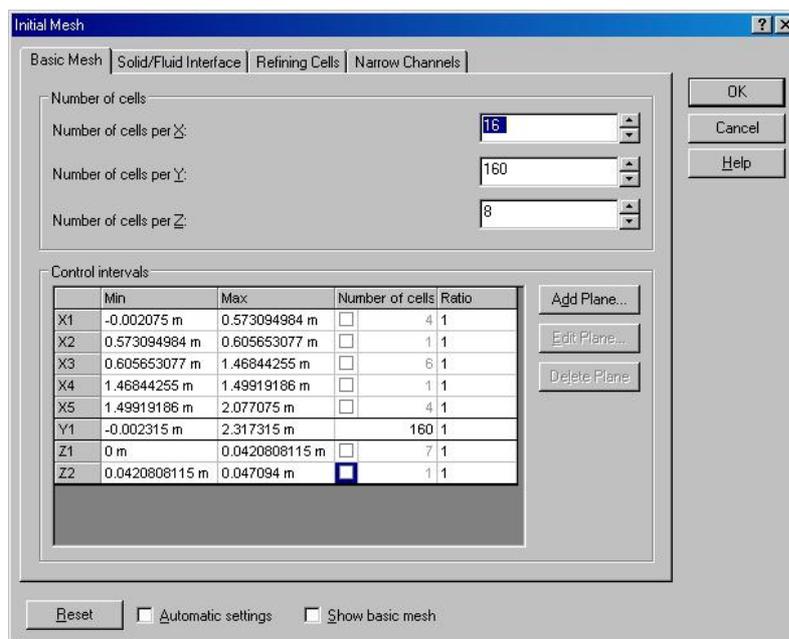


Figura 4.37 Configuración de parámetros de la malla inicial.

Así se consigue una malla que representa de mejor manera al sistema.

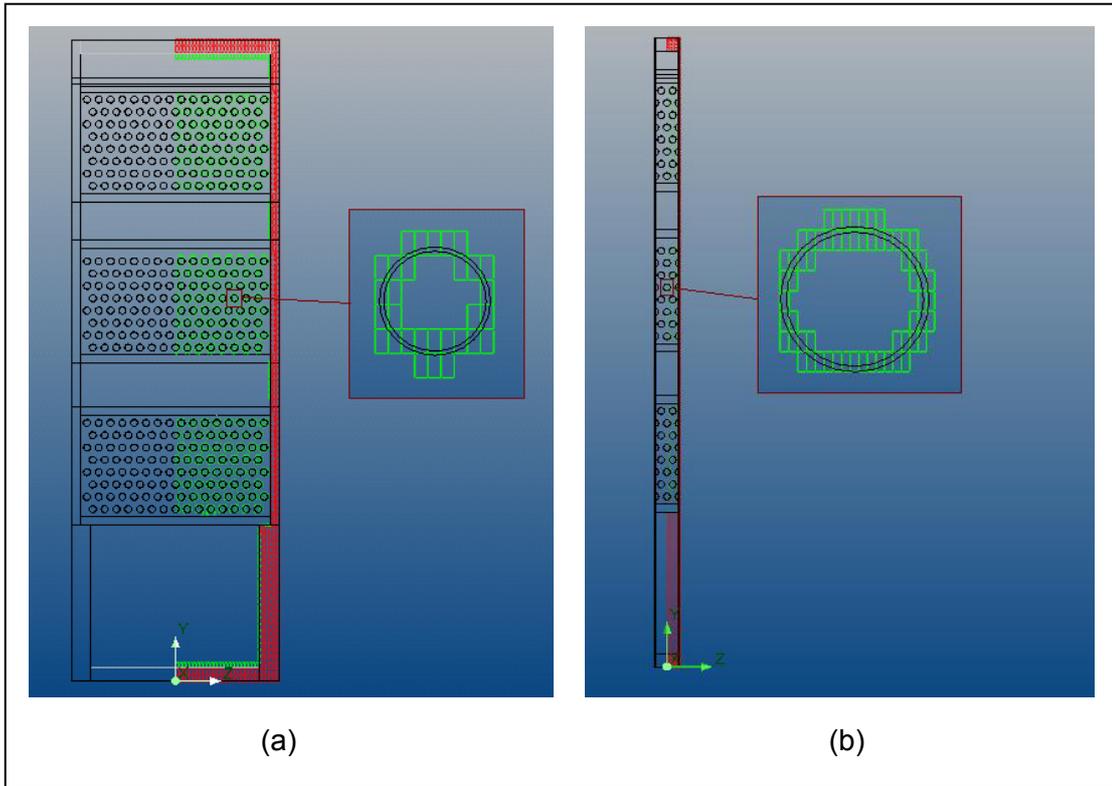


Figura 4.38 Geometría y malla: a) Inicial, b) Final.

4.1.11. Corrida de la simulación

Una vez que está definida la malla para la simulación se procede a ejecutar el cálculo, para lo cuál se ejecuta el comando “Run..” del menú “FloWorks” opción “Solve”.

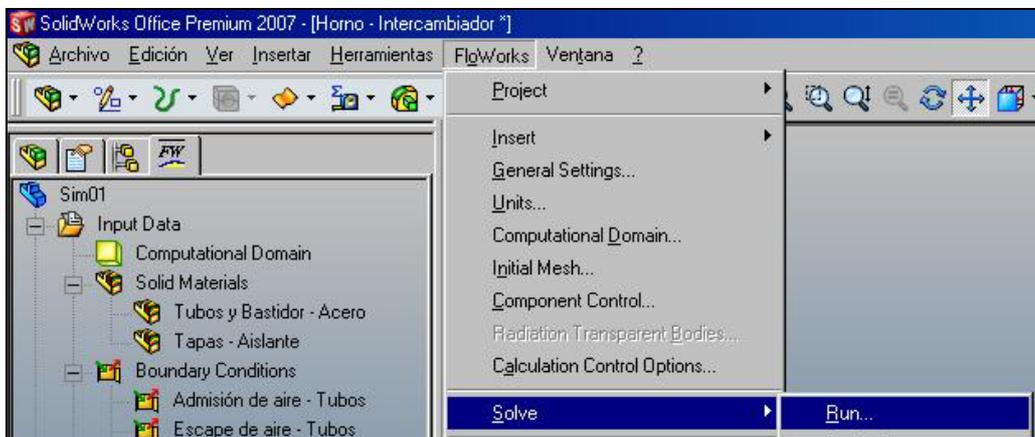


Figura 4.39 Acceso al cálculo de la simulación.

Se presiona el botón “Run” y el cálculo de la simulación empieza.

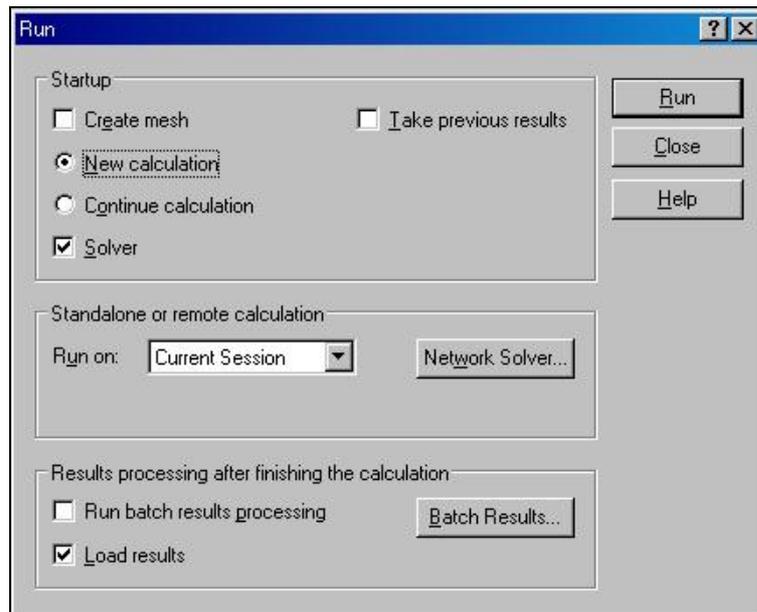


Figura 4.40 Ejecución del cálculo de la simulación.

Aparece el “Solver” del programa FloWorks donde se visualiza el cálculo.

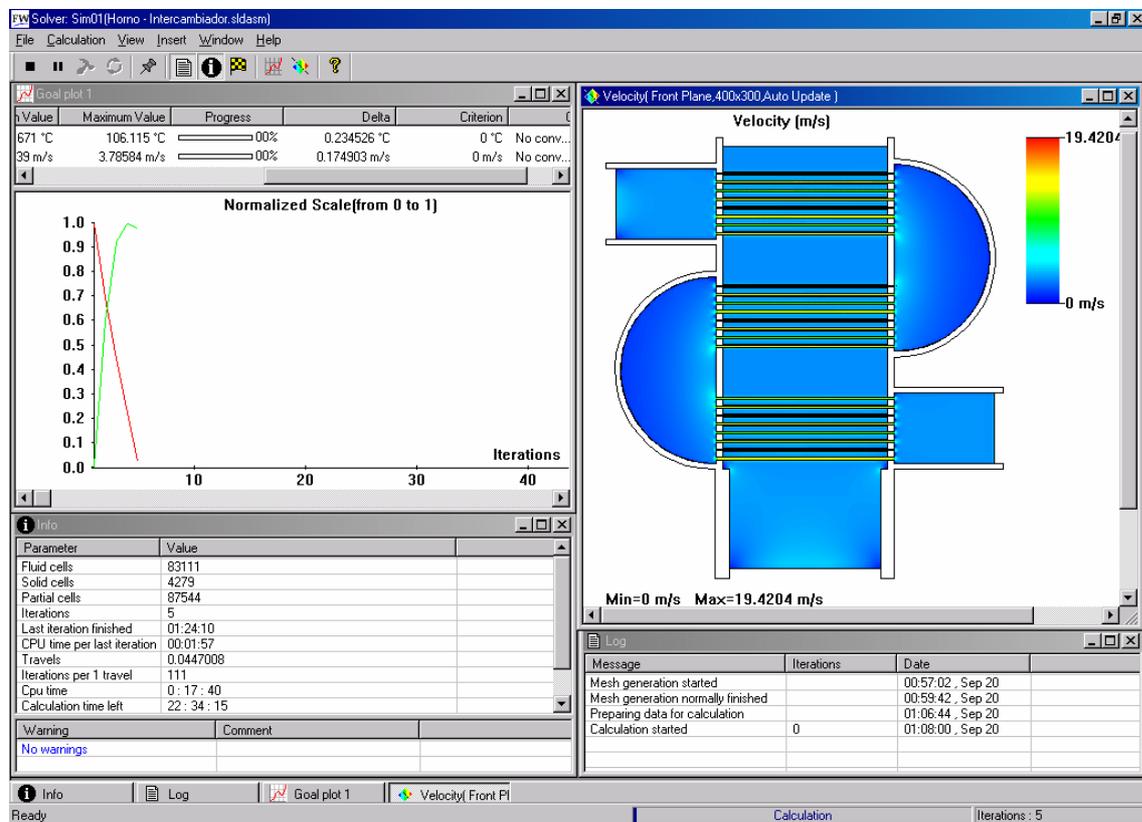
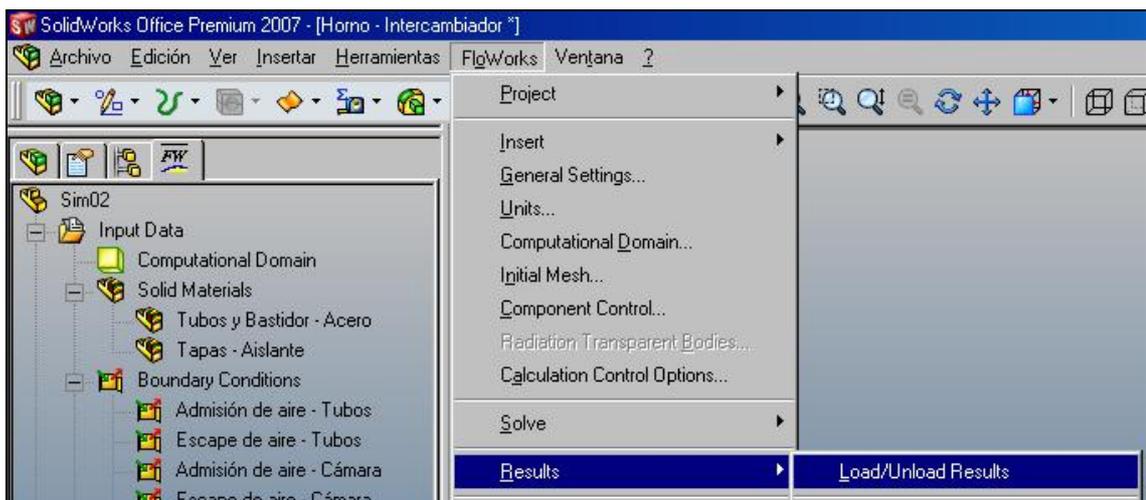


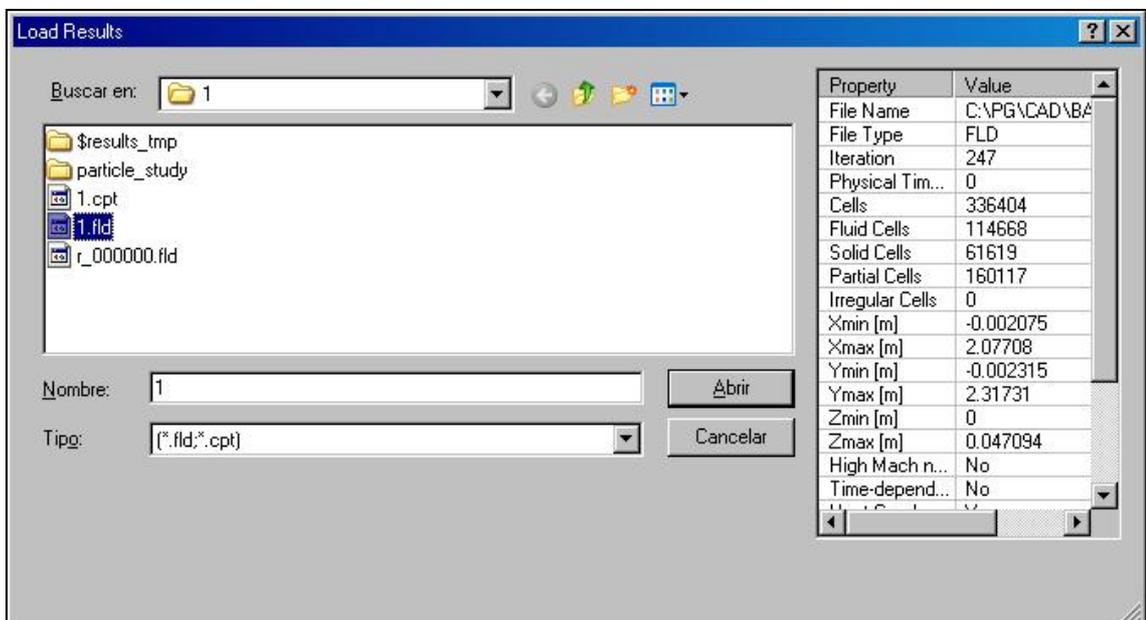
Figura 4.41 Pantalla del “Solver” de Cosmos FloWorks.

4.2. Procedimiento de desarrollo, control y presentación de resultados

Una vez que se ha finalizado el cálculo de la simulación se procede a cargar los resultados de la siguiente manera, usando el comando “Load/Unload Results” del menú “FloWorks” opción “Results” y seleccionando el archivo con la extensión “.fld”, el cuál contiene toda la información respecto del cálculo.



(a)

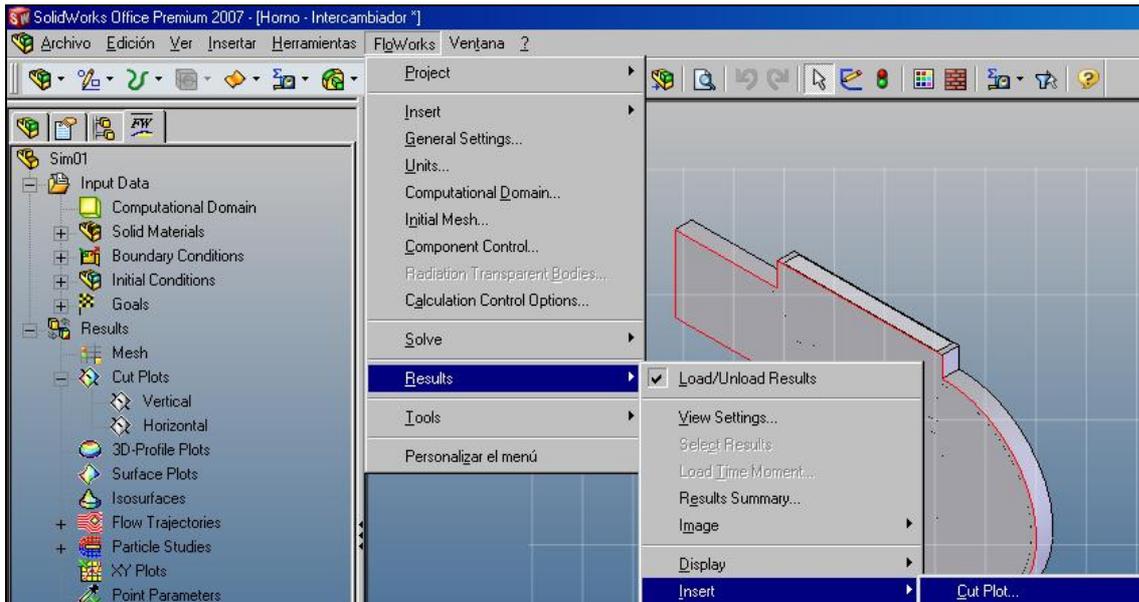


(b)

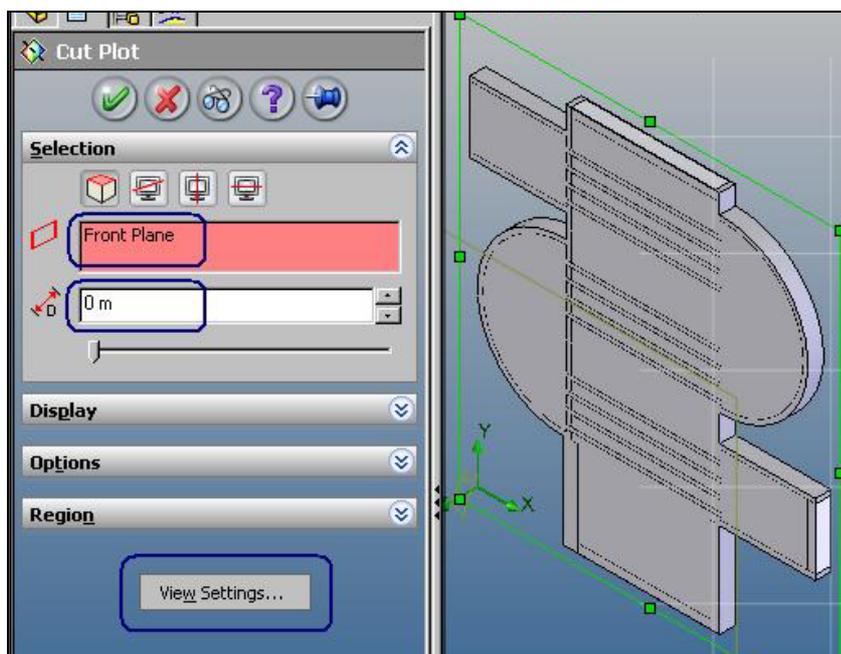
Figura 4.42 Carga de resultados. (a) Comando (b) Selección del archivo ".fld"

En la presentación de resultados nos interesa que se visualicen los valores obtenidos de las variables del fluido, que en este caso son la temperatura y velocidad de las 2 trayectorias de aire que viajan por el sistema.

Se procede a visualizar los resultados en función de mostrar varios cortes longitudinales y transversales del sistema, para ello se ejecuta “Cut Plot...” del menú “FloWorks” submenú “Results” opción “Inset”



(a)



(b)

Figura 4.43 Cortes para presentación de resultados (a) comando (b) opciones

Se selecciona un plano sobre el cuál se visualizará los resultados, además se tiene la opción de que estos resultados sean presentados en un plano paralelo al señalado y de manera seguida se puede personalizar la visualización de estos resultados a través de la opción “View Settings...”.

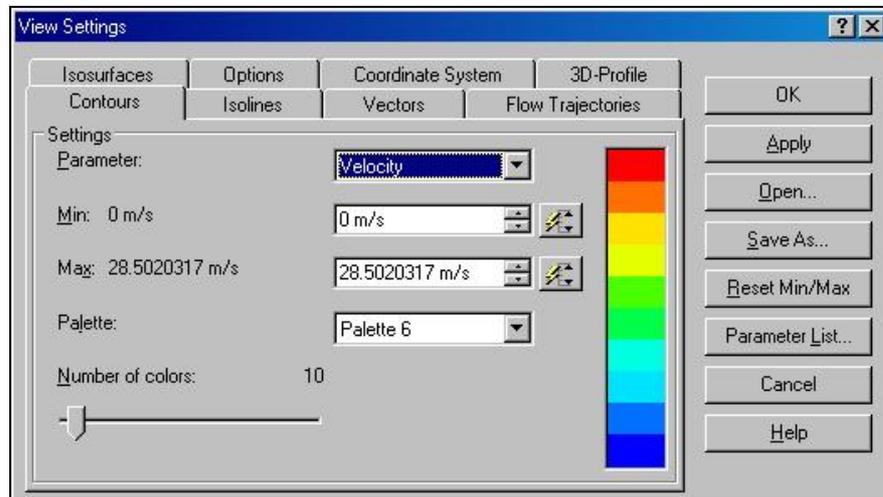


Figura 4.44 Menú de opciones de los parámetros de visualización de resultados

Una vez que se ha definido los parámetros (Ej. Velocidad o temperatura) de visualización y opciones del corte se da clic en aceptar estas ventanas y seguidamente aparecen en pantalla los resultados.

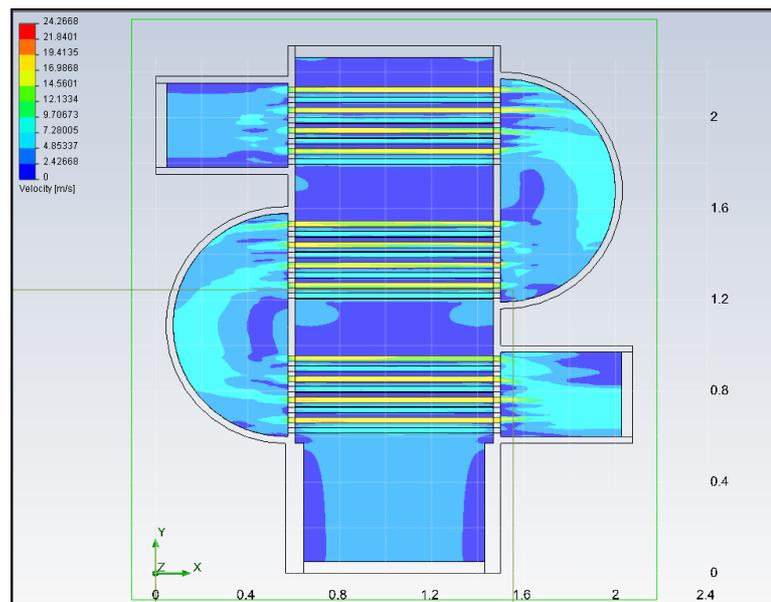
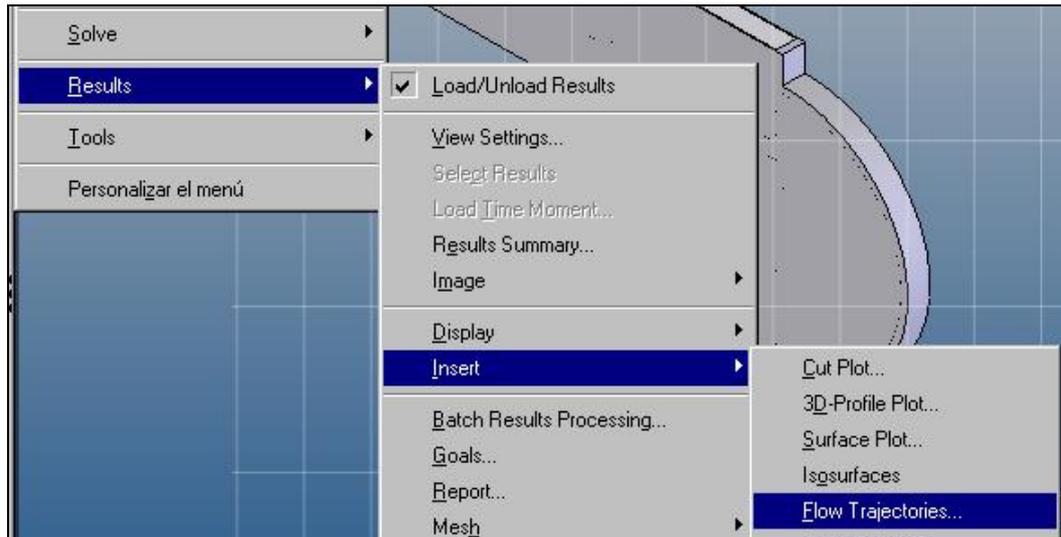


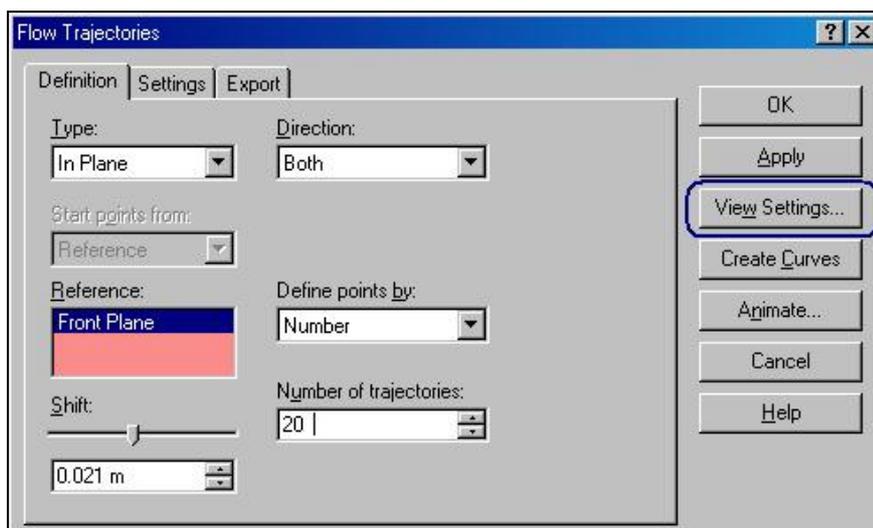
Figura 4.45 Ejemplo de la visualización de resultados de la velocidad del aire.

En la revisión de resultados es importante considerar la presentación de las trayectorias que tuvieron los flujos de aire, esto permite que los resultados puedan ser interpretados con mayor facilidad.

Para visualizar la trayectoria que tuvieron los fluidos cuando se desplazaron por el sistema se procede a ejecutar el comando “Flow trajectories...” del menú “FloWorks” submenú “Results” opción “Inset”



(a)



(b)

Figura 4.46 Desplazamiento del aire en el sistema (a) comando (b) opciones

Del mismo modo en que se configuró la visualización de las variables del fluido se procede con este comando.

Una vez configurado y aceptado este comando se visualiza la trayectoria del aire dentro del sistema.

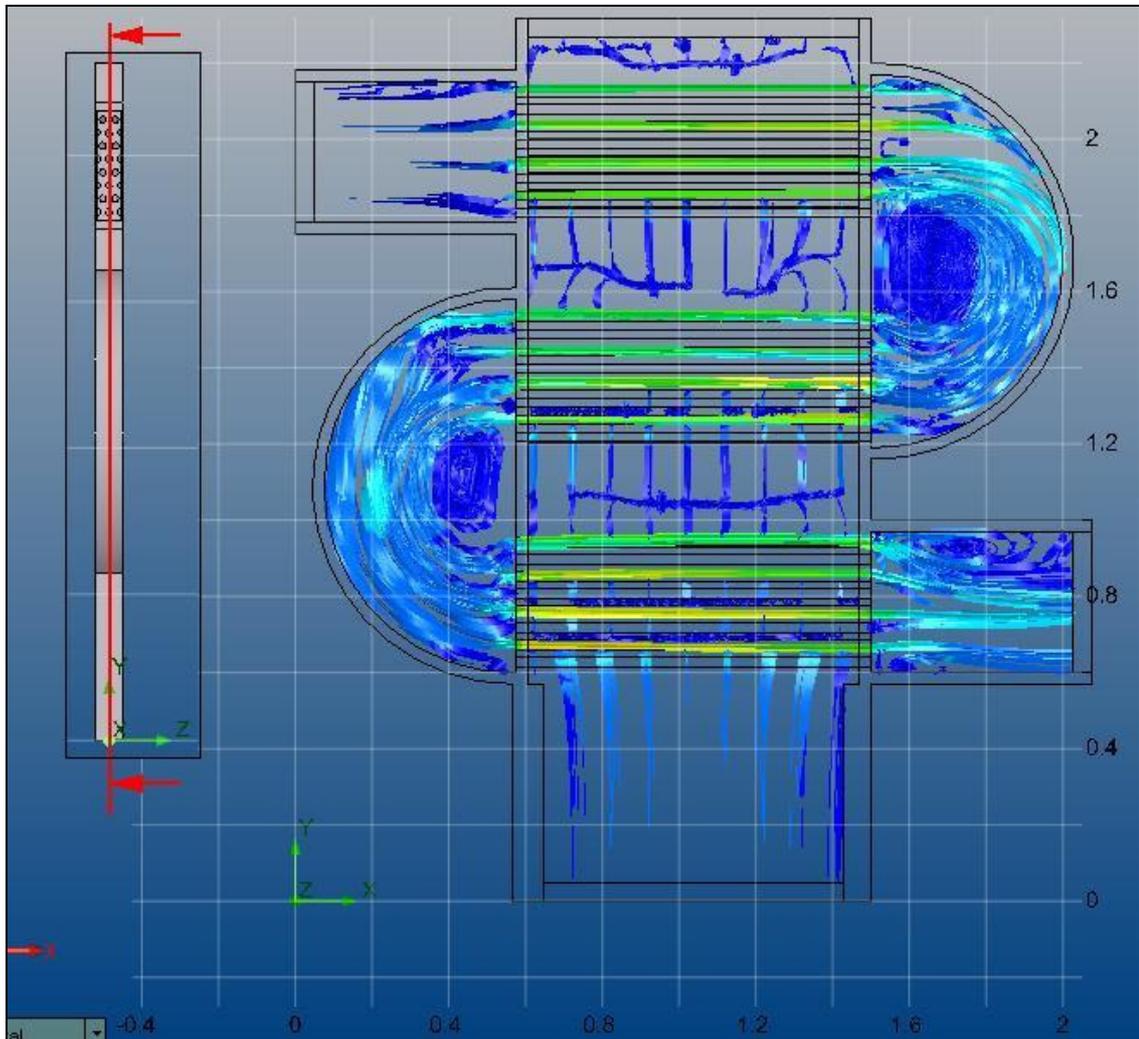


Figura 4.47 Ejemplo de la visualización de las trayectorias del aire.

CAPITULO 5

ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

5.1. Análisis económico

5.1.1. Consideraciones.

En vista que el presente documento no incluye inversiones en materiales o insumos, gastos de fabricación u otros aspectos relacionados con el desarrollo de la maquina o equipo se incluye como recursos para el análisis económico los siguientes:

- a. Levantamiento de información. Consiste en documentar información referente al tratamiento de la biomasa residual así como del documentar el modelo físico que se pretende desarrollar la simulación.
- b. Modelado CAD. Consiste en elaborar un modelo tridimensional computarizado del sistema real.

- c. Simulación en CosmosFloworks. Fundamenta el cálculo de ecuaciones que gobiernan un fenómeno físico a través de métodos numéricos.
- d. Elaboración de documentación técnica. Radica en documentar el las tareas y los resultados de la simulación computarizada.
- e. Asesoramiento técnico. Consiste en tener conversaciones sobre los fundamentos técnicos del sistema con personal que dispone de un buen conocimiento del tema.

5.1.2. Resumen presupuestario

A continuación se muestra una tabla que contiene un resumen del presupuesto para el desarrollo de la simulación.

Tabla 5.1 Resumen presupuestario

Orden	Rubro	Unidad	Cantidad	Valor	Subtotal
1	Levantamiento de información	Hrs.	48	\$ 6,50	\$ 312,00
2	Modelado CAD tridimensional	Hrs.	30	\$ 12,00	\$ 360,00
3	Simulación en CosmosFloWorks	Hrs.	150	\$ 15,00	\$ 2.250,00
4	Elaboración de documentación técnica	Hrs.	96	\$ 6,50	\$ 624,00
5	Asesoramiento técnico	Hrs.	36	\$ 10,00	\$ 360,00
6	Misceláneos	Unid.	1	\$ 144,00	\$ 144,00
				Total	\$ 4.050,00

5.1.3. Ingresos y egresos referenciales.

Para motivos de análisis se considera que esta simulación es vendida 2 simulaciones por año en un periodo de 3 años, con un precio de venta al público constante por el lapso mencionado.

Se calcula cual es el valor de precio venta al publico de la simulación partiendo del total requerido en el resumen presupuestario, tabla 6.1, considerando una utilidad del 15% del costo y un 12% de impuesto al valor agregado (IVA).

Tabla 5.2 Precio de venta al público de la simulación

Costo	\$ 4.050,00
Utilidad (15% del costo)	\$ 607,50
Subtotal (1) (Costo + Utilidad)	\$ 4.657,50
Impuesto al valor agregado (IVA = 12%)	\$ 558,90
Subtotal (2) (Subtotal 1 + IVA)	\$ 5.216,40
Precio Venta al Público (PVP)	\$ 5.216,40

Como se mencionó si la simulación sería comercializada y en base a la proyección de ventas de 2 simulaciones por año en un lapso de 3 años se tiene que los ingresos por año quedarán:

Tabla 5.3 Proyección de ingresos anual.

Valor de venta de la simulación	\$ 5.216,40
Número de simulaciones vendidas por año	2
Valor total de ingresos anual	\$ 10.432,80

Para ejecutar la comercialización de la simulación se considera un valor de gasto anual; que implica los costos de instalación y mantenimiento de la simulación, gestión de publicidad focalizada a clientes específicos, disponibilidad de accesoria técnica posventa.

Tabla 5.4 Proyección de egresos anual.

Instalación y mantenimiento	\$ 1.020,00
Publicidad focalizada	\$ 4.120,00
Servicio posventa	\$ 650,00
Valor total de egresos anual	\$ 5.790,00

5.2. Análisis financiero

5.2.1. Consideraciones.

Se considera una tasa de actualización del 18% anual y una vida útil del proyecto de 3 años.

5.2.2. Cálculo de índices de rentabilidad TIR y VAN

A continuación se muestra una tabla con una proyección del flujo de caja.

Tabla 5.5 Proyección de flujo de caja

Año	Flujo de pagos	Flujo de cobros	Flujo de caja	Acumulado
0	-5.216,40		-5.216,40	-5.216,40
1	-5.790,00	10.432,80	-573,60	-573,60
2	-5.790,00	10.432,80	4.069,20	4.069,20
3	-5.790,00	10.432,80	8.712,00	8.712,00

Se ordena los datos requeridos para determinar los índices de rentabilidad.

Tabla 5.6 Remen de datos requeridos para los índices.

Tasa de actualización (Tasa anual de descuento)	18,0%
Costo inicial de la inversión	-5.216,40
Rendimiento del primer año	-573,60
Rendimiento del segundo año	4.069,20
Rendimiento del tercer año	8.712,00

Con la ayuda de la hoja de cálculo electrónica (Excel) se determina los índices.

Tabla 5.7 Valor de los índices de TIR y VAN

VAN	\$ 2.137,56
TIR	36,2%

Los valores de los índices de rentabilidad son favorables.

5.2.3. Fuentes de financiamiento

Las posibles fuentes de financiamiento para este proyecto son las entidades bancarias, cooperativas, o una alianza con una compañía que está interesada en promover el desarrollo empresarial mediante el acceso a de créditos financieros.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Al concluir este proyecto el laboratorio de energías no renovables del DECEM dispone de una simulación computarizada del comportamiento térmico del los dos flujos de aire que intervienen en el intercambiador de calor del sistema de combustión de biomasa residual.
- La correcta comprensión y definición del fenómeno físico, él cual gobierna al sistema de obtención de energía térmica mediante el uso de la biomasa permite desarrollar una simulación de resultados fiables.
- La adecuada modificación y eliminación de detalles en el modelo computarizado tridimensional del sistema asegura que no se requieran recursos computacionales excesivos.

- La adecuada presentación de los resultados de la simulación permiten tener mayor información y entendimiento acerca de la respuesta y evolución que presentan las dos corrientes de aire del intercambiador de calor bajo las condiciones operativas impuestas al sistema.
- Para ser competitivos en cualquier área de la ciencia y la tecnología de hoy es indispensable incorporar, adoptar y adaptar las metodologías de simulación por computador al campo específico de trabajo, con el propósito de obtener un mejor rendimiento en el desarrollo profesional.

6.2. Recomendaciones

- Fomentar el desarrollo de los proyectos de simulaciones computarizadas acerca de los equipos pertenecientes al laboratorio de energías no renovables del DECEM.
- Incrementar la bibliografía sobre la tecnología disponible actualmente en el aprovechamiento de las energías renovables.
- Concebir los modelos tridimensionales básicos de cualquier sistema sin perder su concepto requiere de recursos computacionales aceptables para ejecutar el cálculo de la simulación.
- Analizar los resultados de la simulación y proponer proyectos de mejora al sistema y de esta manera mejorar su eficiencia.
- Promover el uso de herramientas computarizadas en el desarrollo de proyectos de grado, en los cuales se analicen los procesos industriales y que se corrija los problemas en la etapa de desarrollo y no durante las etapas de pruebas de funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- KARAMCHETI Krishnamurty, Principles of Ideal-Fluid Aerodynamics, Publishing Company, 1966.
- AVALLONE–BAUMEISTER, Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, Tenth edition, McGraw-Hill, 1999
- MOTT Robert, Mecánica de fluidos Aplicada, 4ta edición, Prentice Hall, 1996.
- CENGEL Yunus, Thermodynamics – An Engineering Approach, Third edition, McGraw-Hill, 1998
- TRINKS W, Hornos Industriales, primera edición, Urmo ediciones, 1975
- GUASUMBA, José, Sistema de combustión de cascarilla de arroz, CENCO, 1998-2006
- CosmosFloworks Fundamentals, Structural research & analysis corp, 2007
- www.ren21.org, Renewable Energy Policy Network, Reporte 2007 de estatus global de energías renovables, 2008.
- www.superbrix.com, Horno quemador de biomasa, 2007
- www.textoscientificos.com/energia, biomasa, 2007
- www.agroinformacion.com, Aprovechamiento energético de los subproductos del cultivo del arroz, 2003
- www.wikipedia.com, Navier-Stokes, 2007

ANEXOS

ANEXO 1

GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO

TEMA:

Determinar el comportamiento térmico de las dos corrientes de aire que intervienen en el intercambiador de calor del sistema de combustión de biomasa residual a través de la corrida de una simulación computarizada en el programa CosmosFlowworks.

A. Objetivos:

- Representar gráficamente el comportamiento térmico de las dos corrientes de aire que intervienen en el sistema.
- Analizar los resultados obtenidos y proponer mejoras al sistema original.

B. Equipos y materiales.

- Ordenador con memoria RAM superior a 1GB y velocidad de procesador superior a 2.8 GHz (Pentium IV o superior)

- Programa computacional SolidWorks versión 2007 o superior
- Programa computacional CosmosFloWorks versión 2007 o superior
- CD con archivos del modelo tridimensional del sistema y los archivos de la simulación.
- Proyecto de grado “Simulación del comportamiento térmico del sistema de combustión de biomasa residual del laboratorio de energías no convencionales del DECEM” elaborado por Carlos Vinueza, año 2008.

C. Fundamento teórico.

Para conocer el fundamento teórico de la simulación revisar el capítulo 2 y 3 del proyecto de grado “Proyecto de grado “Simulación del comportamiento térmico del sistema de combustión de biomasa residual del laboratorio de energías no convencionales del DECEM”.

D. Procedimiento.

1. Copiar los archivos del modelo tridimensional y la simulación computarizada a un ordenador; copiar estos archivos en una carpeta que se encuentre (o cree) en la raíz del disco duro con el nombre de sistema, ejemplo: C:\sistema>
2. Ejecute el programa Solidworks y active el complemento CosmosFloworks.
3. Busque y abra el archivo con el nombre “Horno – Intercambiador.sldasm”
4. Elabore una combinación de datos con los parámetros de velocidad y temperatura de ingreso de aire frío (interior de los tubos) y con los de velocidad y temperatura del aire caliente (aire que sale de la cámara de combustión) del sistema; cambie estos valores en la simulación de acuerdo al procedimiento indicado en el capítulo 4 del proyecto de grado “Proyecto de grado “Simulación del comportamiento térmico del sistema de combustión de biomasa residual del laboratorio de energías no convencionales del DECEM” y ejecute el cálculo de la simulación.

E. Resultados a reportar

Muestre los datos de velocidad, temperatura y trayectoria de las corrientes de aire correspondientes al cálculo de la simulación de acuerdo como lo indica el capítulo 4 del proyecto de grado antes mencionado.

F. Conclusiones y Recomendaciones.

Analice los datos mostrados de las corrientes de aire que intervienen en el sistema y concluya cuales sería las mejores condiciones operativas de las corrientes de aire para aprovechar la actual configuración y capacidad del sistema y proponga que cambios deben realizarse al sistema para mejorarlo.

ANEXO 2

RESULTADOS COMPLEMENTARIOS DE LA SIMULACIÓN

2 Videos de los resultados de la simulación están disponibles en una carpeta que tiene el nombre de “Anexo 2” en el CD adjunto al proyecto de grado “Simulación del comportamiento térmico del sistema de combustión de biomasa residual del laboratorio de energías no convencionales del DECEM” elaborado por Carlos Vinuesa, año 2008.