



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

MEJORA EN LA GESTIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA MICRO Y PEQUEÑA EMPRESA EN EL PERÚ (MYPE)

Mónica Talledo-Jiménez

Piura, octubre de 2013

FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales

La Madrid, R. (2012). *Uso eficiente de la energía térmica producida por la combustión de biomasa*. Tesis de maestría en Gestión y Auditorías Ambientales. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**“USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA TÉRMICA PRODUCIDA POR LA COMBUSTIÓN DE
BIOMASA”**

Tesis para optar el Título de
Máster en Gestión y Auditorías Ambientales

RAÚL LA MADRID OLIVARES

Piura, Enero 2012

**A Dios, a la memoria de mi padre,
a mi madre y a mis hermanos
por su constante apoyo.**

Prólogo	vii
Resumen	ix
Índice.....	xi
Introducción.....	1
Capítulo 1	3
1 La agroindustria panelera	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Proceso de producción de panela.....	6
1.2.1 Extracción de la materia prima	6
1.2.2 Recepción de la materia prima	6
1.2.2.1 Pesaje de la caña	6
1.2.2.2 Almacenamiento de la caña	7
1.2.3 Molienda	7
1.2.3.1 Molinos horizontales.....	7
1.2.4 Pre-limpieza.....	8
1.2.5 Almacenamiento de los jugos.....	10
1.2.6 Clarificación	10
1.2.6.1 Neutralización de los jugos	10
1.2.7 Evaporación y concentración	10
1.2.8 Punteo	11
1.2.9 Cristalización y enfriamiento	11
1.2.10 Tamizado	12
1.3 Buenas Prácticas Agrícolas (BPA)	12
1.3.1 Ventajas de la utilización de BPA	12
1.3.2 Filosofías de las BPA.....	13
1.4 Hornilla panelera	13
1.4.1 Cámara de combustión.....	13
1.4.2 Ducto de gases.....	14
1.4.2.1 Pailas	14
1.4.3 Chimenea.....	17
1.5 Impactos de la producción de panela granulada	17
1.5.1 Impactos ambientales.....	17

1.5.2	Impactos económicos y sociales.....	18
Capítulo 2		19
2	Modelos matemáticos.....	19
2.1	Modelo matemático para el flujo de fluidos.....	19
2.1.1	Modelos matemáticos en Ansys Fluent	19
2.1.1.1	Generalidades de los modelos físicos en Ansys-Fluent.....	19
2.1.1.2	Ecuaciones de conservación de la masa y la cantidad de movimiento...20	
2.1.1.3	Modelos de turbulencia.....	20
2.1.1.4	Modelos de transferencia de calor	21
2.1.2	Modelos utilizados en el caso estudio.....	22
Capítulo 3		25
3	Caso estudio: Paila aleteada.....	25
3.1	Programa Ansys-Fluent.....	25
3.1.1	Aplicaciones	25
3.1.2	¿Qué es la Mecánica de fluidos computacional?.....	25
3.1.3	¿Cómo funciona Ansys-Fluent?	26
3.1.4	Visión general y modelación en CFD.....	26
3.1.4.1	Identificación del problema.....	27
3.1.4.2	Pre-proceso.....	28
3.1.4.3	Solución	29
3.1.4.4	Post-proceso	29
3.2	Enunciado del problema en estudio	29
3.3	Construcción de la malla.....	31
3.3.1	Construcción de la malla utilizando el mallador por defecto de Ansys - Workbench.....	31
3.3.1.1	Patch Conforming Method.....	34
3.3.1.2	Inflation.....	34
3.3.1.3	Face Sizing.....	35
3.3.2	Construcción de la malla utilizando la herramienta ICEM.....	36
3.3.3	Malla finalizada	37
3.3.4	Superficies seleccionas como condiciones de frontera.....	38
3.4	Condiciones de frontera	38
3.4.1	Condición <i>inlet</i>	39
3.4.1.1	Cálculo de la intensidad de la turbulencia y diámetro hidráulico	39
3.4.2	Condición <i>outlet</i>	42

3.4.3	Condición <i>wall</i>	43
3.4.4	Condición <i>symmetry</i>	44
Capítulo 4		45
4	Resultados.....	45
4.1	Cálculo de la potencia térmica	45
4.2	Simulación de la transferencia de calor de la paila aleteada	51
4.3	Simulación de la transferencia de calor de la paila aleteada al variar la altura del ducto.....	53
Conclusiones.....		61
Bibliografía.....		63
Anexo 1: Plano del ducto de humos		65
Anexo 2: Plano de la paila.....		67
Anexo 3: Resumen de modelos, materiales y condiciones de frontera.....		69
Anexo 4: Cálculo de la potencia térmica		73

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra la realización de un modelo y simulación de una paila aleteada, el cual será confrontado con datos analíticos y experimentales. Como resultados experimentales se utilizarán los obtenidos en mediciones efectuadas en la primera paila evaporadora tipo aleteada de la hornilla panelera ubicada en la localidad de Santa Rosa de Chonta (Montero, Ayabaca), y como resultados analíticos los obtenidos para su diseño y dimensionamiento.

La primera parte de esta investigación, muestra un resumen sobre el proceso productivo de panela, en el que se detallan sus principales pasos, también se citan algunas buenas prácticas a tener en cuenta en esta industria. Adicionalmente, se mencionan los componentes de una hornilla panelera y por último los impactos ambientales, económicos y sociales.

En esta tesis, se muestran los modelos matemáticos utilizados y se hace una descripción del fenómeno en estudio, se presentan los detalles de la malla y condiciones de frontera utilizadas. Para la simulación, se ha utilizado el programa Ansys-Fluent versión 13, el cual es un software comercial de mecánica de fluidos computacional.

Finalmente, se presentan las conclusiones del análisis efectuado, así como los posibles usos del modelo realizado.

Introducción

Las pailas han sido y son ampliamente utilizadas como intercambiadores de calor abiertos en la industria panelera. Su función es evaporar el agua del jugo de la caña de azúcar hasta su concentración como miel que posteriormente, es batida y enfriada para obtener la panela granulada.

Las técnicas MFC¹ han sido aplicadas para resolver numerosos problemas de termodinámica y transferencia de calor, incluyendo investigaciones referidas a mejorar la eficiencia de intercambiadores de calor **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Por lo tanto, el propósito del presente trabajo de tesis, es aplicar estas técnicas para corroborar la tasa de transferencia de calor en una paila aleteada además de predecir cuál es el efecto de la altura del fondo de la paila respecto del piso del ducto de humos en la transferencia de calor.

El procedimiento se inicia con la construcción de la geometría del sistema en estudio y posterior mallado del volumen. Para la simulación se ha utilizado el programa comercial Ansys-Fluent versión 13.

El estudio de la transferencia de calor en intercambiadores utilizando el software Fluent ha sido ampliamente utilizado; a modo de ejemplo, se mencionan los trabajos de: Jayakumar et. al. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que estima la transferencia de calor en intercambiadores helicoidales, Galeazzo et. al. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que presenta un estudio de transferencia de calor aplicado a intercambiadores de platos, Van der Vyver et. al. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que realiza un estudio de un intercambiador de calor tipo tubo doble.

El empleo de la MFC para el estudio de la transferencia de calor en pailas para la industria panelera es mínimo, los únicos estudios encontrados son los siguientes: Gordillo et. al. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** realiza un estudio del comportamiento del jugo en una paila pirotubular y Yépez Oblitas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que simula la transferencia de calor en una paila pirotubular.

¹ La mecánica de fluidos computacional (MFC) es la ciencia que consiste en predecir el flujo de fluidos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados, mediante la solución numérica del conjunto de las ecuaciones de conservación.

Para una buena comprensión y presentación de los puntos más resaltantes del tema, este estudio presenta cuatro capítulos.

En el primer capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos del proceso de obtención de panela, buenas prácticas, componentes de una hornilla panelera e impactos de esta industria.

En el segundo, se describe los modelos matemáticos utilizados en la modelación del fenómeno en estudio.

En el tercero se define el problema a simular, geometría, malla y condiciones de frontera utilizadas.

Por último, en el cuarto capítulo, se presenta los resultados de la simulación del modelo y la interpretación del comportamiento de cada uno de los parámetros mostrados.

Capítulo 1

La agroindustria panelera

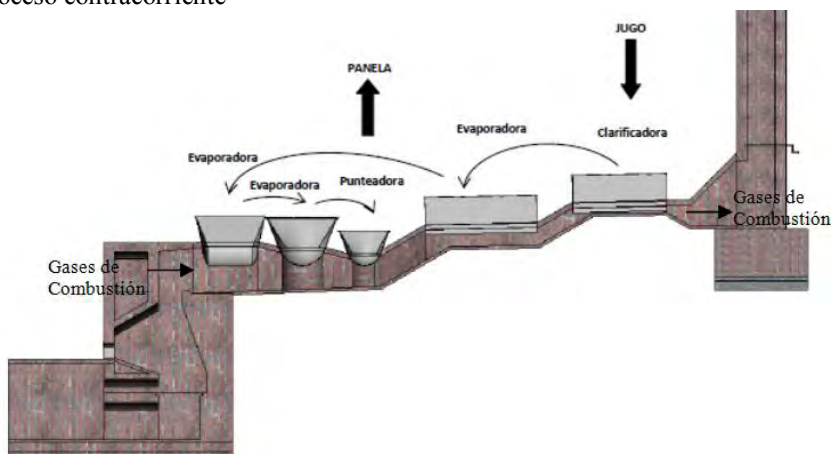
1.1 Introducción

La panela o azúcar orgánica es un edulcorante con características nutritivas que se obtiene mediante la concentración de los sólidos solubles totales, disueltos en el jugo de la caña de azúcar. Se diferencia de la azúcar refinada por contener además de sacarosa, glucosa, fructosa, minerales, grasas, compuestos proteicos y vitaminas.

El proceso incluye dos etapas que se realizan contemporáneamente. Una es la etapa de evaporación del agua presente en el jugo de la caña (directamente ligada al proceso de transferencia de calor) y la otra es la combustión directa del bagazo. El flujo del trasvase de jugo y el de los gases de combustión es a flujo mixto (figura 1.1).

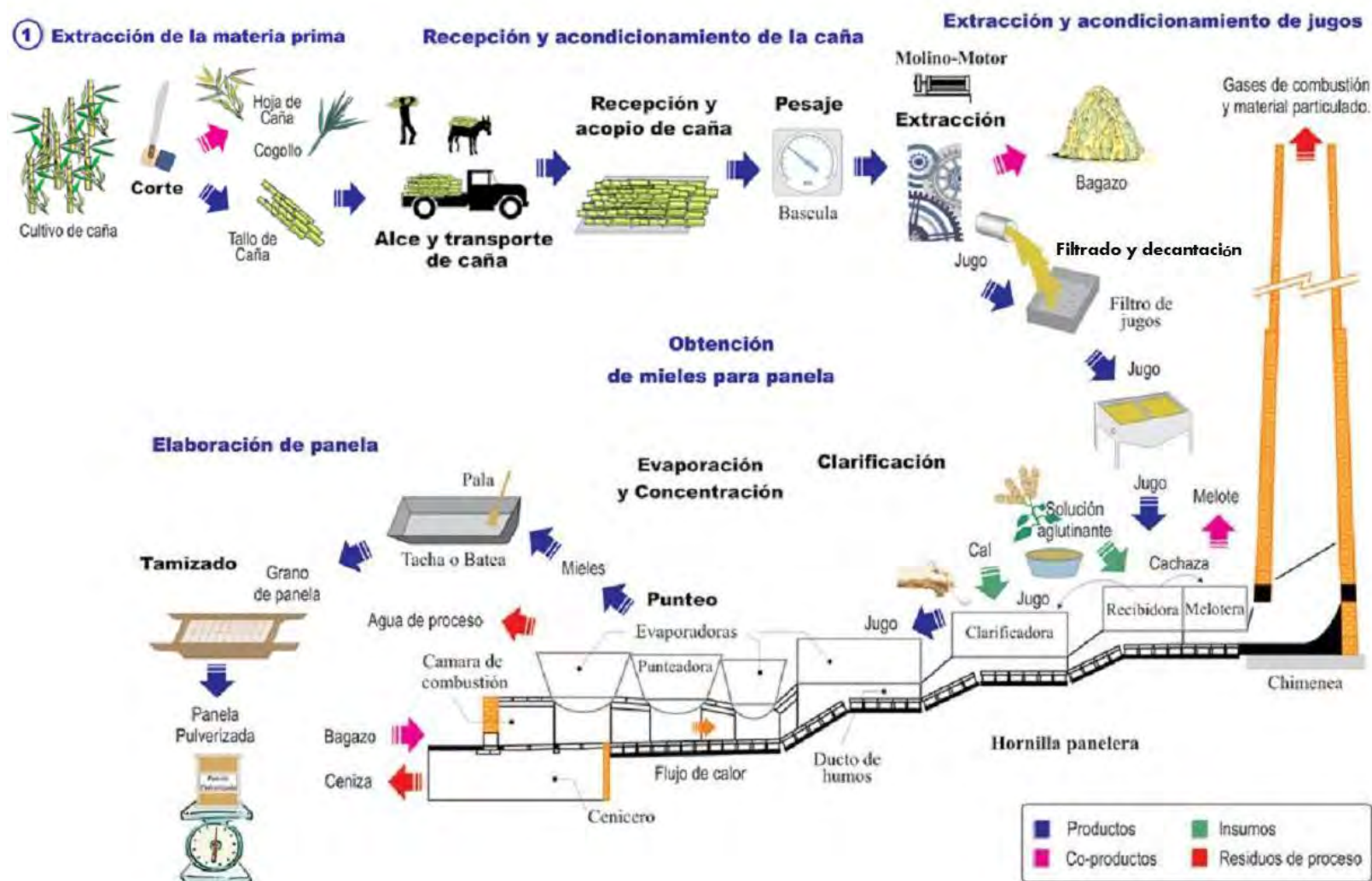
En la figura 1.2 se ilustra el proceso de elaboración de azúcar orgánico. Se inicia con la extracción de la materia prima, seguido de la recepción y acondicionamiento de la caña, extracción y acondicionamiento de jugos (molienda, filtración – decantación y almacenamiento de los jugos), obtención de mieles (clarificación, evaporación, concentración y punteo) y por último la elaboración de la panela (batido – enfriamiento y tamizado). Adicionalmente, se muestra en la figura 1.3 un diagrama de flujo del proceso.

Figura 1.1. Proceso contracorriente



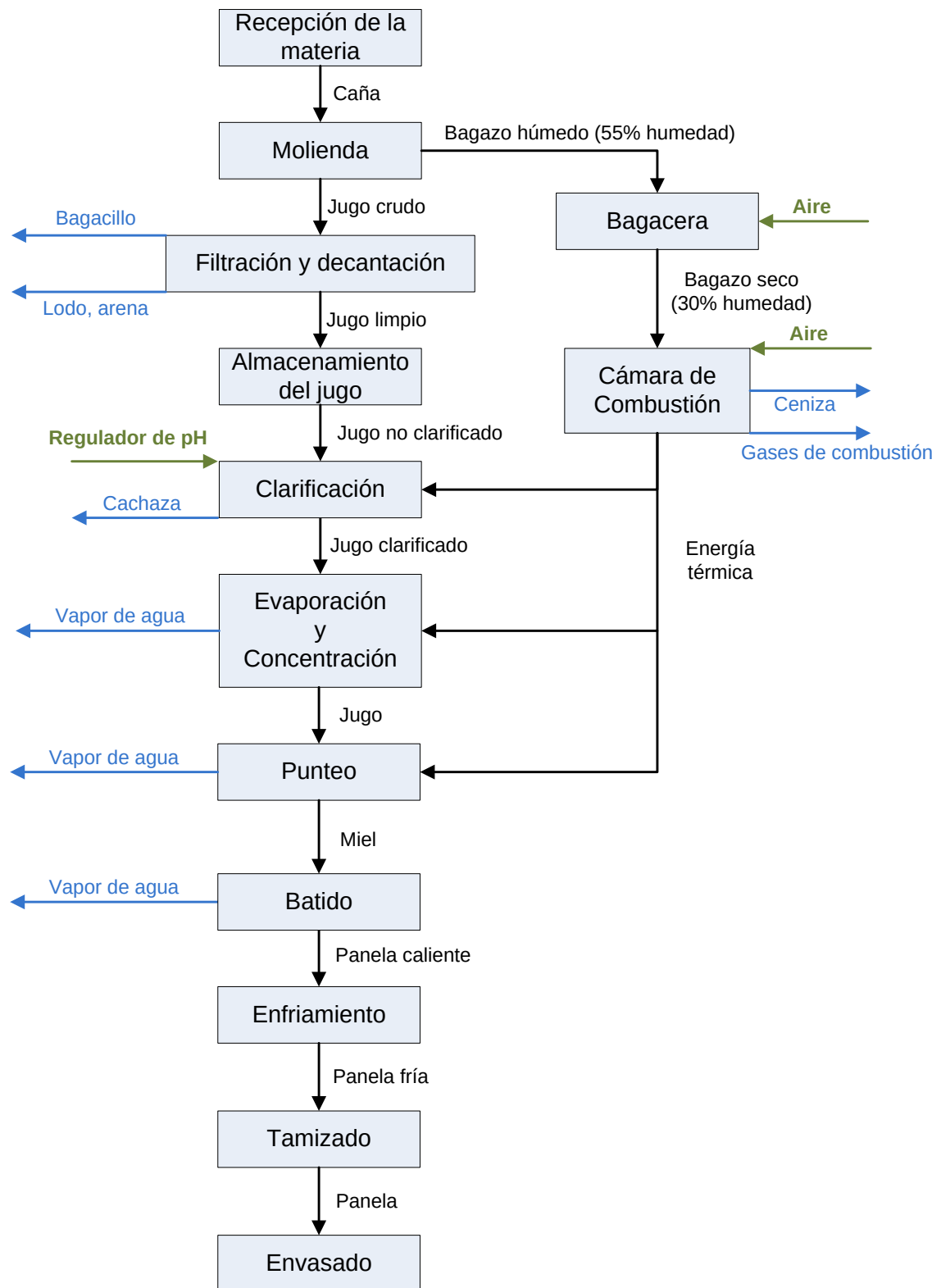
Fuente: Elaboración propia

Figura 1.2. Proceso de producción de panela granulada



Fuente: Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Figura 1.3. Diagrama de flujo del proceso de producción de panela



Fuente: Elaboración propia

1.2 Proceso de producción de panela

1.2.1 Extracción de la materia prima

El corte y transporte de la caña es la fase previa al inicio del proceso de producción de azúcar orgánica y a la vez es de vital importancia, ya que para garantizar una panela de excelente calidad la caña debe de cortarse en el momento óptimo de madurez. La madurez de la caña se logra cuando la concentración de los azúcares es similar en la base y en la parte terminal del tallo. El tiempo que demora la caña en madurar, desde que se siembra, o entre corte y corte, depende de la variedad, las condiciones climáticas y principalmente de la altura sobre el nivel del mar de los campos de cultivo.

Cabe indicar que si se desea producir panela de buena calidad se deben seleccionar cañas maduras, con alto contenido de sacarosa. Pero si se desea producir miel se recomienda emplear cañas inmaduras o sobremaduras, con alto contenido de azúcares reductores¹, para disminuir su cristalización.

Los agricultores usan métodos empíricos para determinar la madurez, y establecer el momento del corte de la caña. Sin embargo, estos métodos no son replicables con seguridad y por tanto los rendimientos del campo y del trapiche, así como la calidad de la azúcar orgánica pueden ser afectados. Por otro lado, los métodos técnicos para determinar el punto de madurez se basan en el establecimiento de la uniformidad de la concentración de los sólidos solubles, a lo largo del tallo de caña, o mediante la determinación del contenido de humedad en ciertos puntos específicos del tallo. Una vez cortada la caña, se transporta del lote de siembra al módulo panelero.

1.2.2 Recepción de la materia prima

A esta fase se le denomina apronte de caña y consiste en almacenar un volumen de caña suficiente para permitir una operación continua de la hornilla. Se recomienda que el área se encuentre cubierta (con techo) y en piso de cemento, esto con la finalidad de que no se adhiera barro a la caña de azúcar lo que podría afectar la calidad de la panela. Un dato útil es que, una tonelada de caña ocupa aproximadamente 2 m³, es decir, un área de 1 m² por 2 m de altura.

1.2.2.1 Pesaje de la caña

Ésta es una operación fundamental para realizar la caracterización técnica de un módulo de producción.

Para realizar esta etapa hay dos posibles formas:

- En primer lugar, utilizar básculas de plataforma, las que son de gran capacidad de hasta 600 kg para caña descargada en animales de carga (mulas) y 10 toneladas para descarga de vehículos, su inconveniente es el elevado costo de éstas.
- En segundo lugar, está la posibilidad de utilizar balanzas de poca capacidad, pero el problema es que al usar este tipo de balanzas se requiere de al menos dos operarios que hagan el trabajo de pesaje, lo que implica un mayor costo de operación (pago a los operarios) y tiempo (se demora y se requiere mayor esfuerzo físico, en comparación con el primer caso).

¹ Los azúcares reductores o invertidos son la glucosa y fructosa.

1.2.2.2 Almacenamiento de la caña

Como pautas generales para el almacenamiento de la caña se tienen los siguientes puntos:

- La caña se debe almacenar en la sombra para evitar que el sol deshidrate el tallo y se acelere el desdoblamiento de la sacarosa², lo que repercute directamente en la calidad de la panela a obtenerse.
- La caña para la producción de panela no puede estar almacenada por más de tres días.
- El lugar donde se almacena la caña, debe de ser elegido de manera que facilite el proceso de molienda.

1.2.3 Molienda

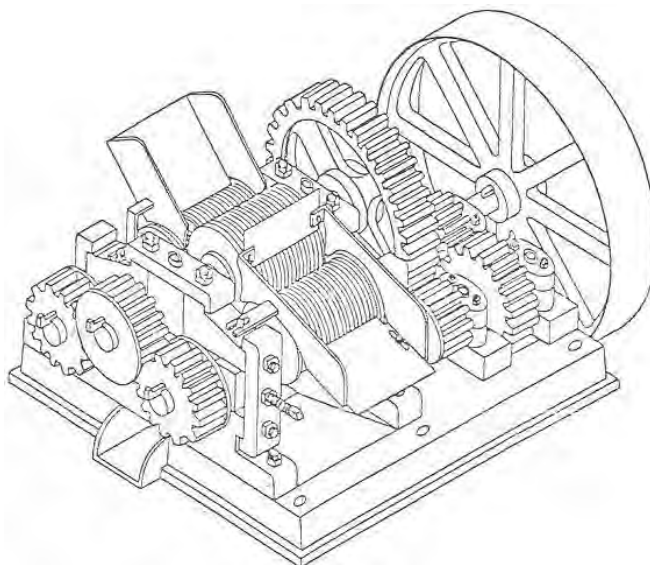
Ésta es la primera parte del proceso y consiste en pasar la caña entre los rodillos o mazas de un molino, para obtener jugos de la caña y además un residuo sólido al que se le denomina bagazo verde el cual tiene entre 50 y 60 % de humedad. En la industria panelera se lleva a cabo un proceso de extracción seca, es decir, el proceso de molienda se realiza sin adición de agua.

1.2.3.1 Molinos horizontales

Este tipo de molinos es el más difundido en la industria panelera. También existen molinos verticales, pero presentan la desventaja de tener baja eficiencia. Los molinos horizontales, deben su nombre a que la configuración de las mazas que utilizan está en disposición horizontal, siendo la mayor parte de molinos de tres mazas (aunque también hay de 5) dispuestas en configuración triangular. La fuente de potencia para accionar estos molinos son motores diesel o eléctricos. En la industria panelera peruana los motores que más se utilizan son los diesel, siendo una agroindustria rural rara vez se dispone de suministro de energía eléctrica trifásica. La figura 1.4 ilustra un molino de tres mazas.

² Inversión de la sacarosa en azúcares reductores (glucosa y fructosa).

Figura 1.4. **Molino horizontal de tres masas**



Fuente: Manual para la selección, montaje y operación de los equipos de molienda para la producción de panela **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

1.2.4 Pre-limpieza

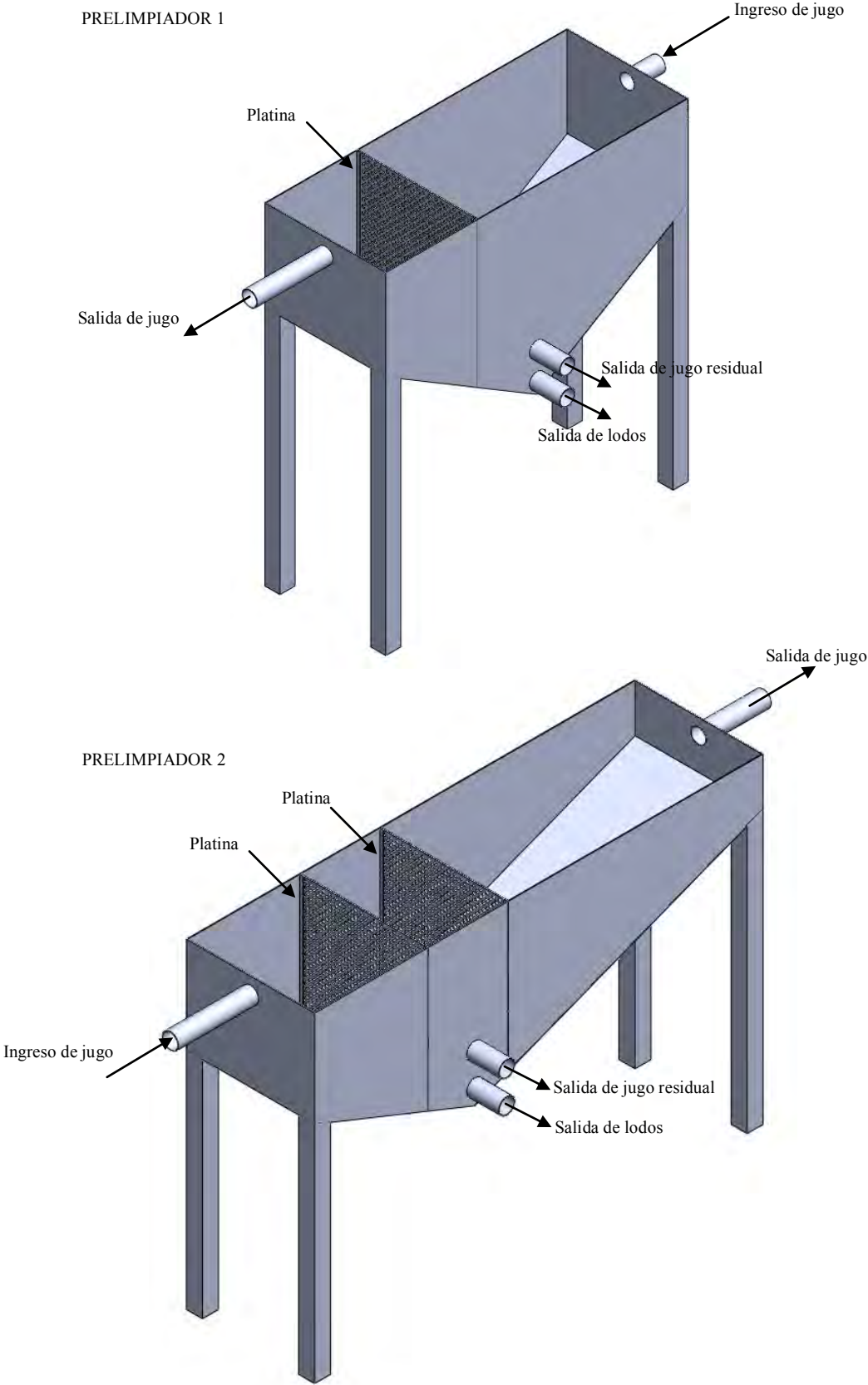
El jugo o guarapo³ que se obtiene durante la molienda, pasa por el pre-limpiador, elemento cuya función es retener las impurezas dispersas en el jugo, constituidas principalmente por restos de bagazo, bagacillo, de caña, tierra, material flotante, lodos y agentes precursores de color⁴. El funcionamiento de los prelimpiadores consiste en la separación de impurezas del jugo, por diferencia de densidades. Al separarlas en frío y antes de iniciar el proceso, se evita que las sustancias precursoras de color, por efecto del calor, se liberen en el jugo logrando una acción negativa en la presentación de la azúcar orgánica. Esta operación se repite hasta lograr la limpieza total del jugo, para garantizar un mejor producto.

Los prelimpiadores se deben ubicar a la salida del jugo del molino, pero separado para evitar la contaminación con aceite y bagacillo. En caso de un volumen de jugo mayor de 500 kg de caña/h se debe ubicar un segundo limpiador en serie. El primero para recibir el jugo del molino y eliminar las impurezas de mayor tamaño, el segundo para retener impurezas con densidades más cercanas a las del jugo (ver figura 1.5). Después de haberse limpiado, el jugo se almacena en un recipiente llamado tanque de almacenamiento o colector, para luego pasar a la etapa de clarificación.

³ Jugo obtenido del proceso de molienda, todavía sin clarificar.

⁴ Agentes que hacen que la panela tenga un determinado color, determinando la calidad de la misma. Un color más claro significa una mejor calidad.

Figura 1.5. **Prelimpiadores**



Fuente: Elaboración propia

1.2.5 Almacenamiento de los jugos

Consiste en recolectar el jugo ya pre-limpiado en el tanque de almacenamiento (paila de acero inoxidable). El paso del jugo almacenado a la paila clarificadora es por gravedad, así que es importante que el colector esté en un nivel superior a la paila clarificadora.

1.2.6 Clarificación

La etapa de clarificación se hace tradicionalmente mediante la acción combinada del calor generado en la hornilla, para lograr un precalentamiento sin evaporación, y neutralización del jugo de caña con la adición de agregado básico, a base de cortezas de plantas como el guácimo, el cadillo (Colombia) y en algunos lugares incluso utilizan ceniza de cáscara de café. La clarificación se lleva a cabo por medio de flotación. En esta etapa se retira la cachaza⁵ en forma de espuma que se forma sobre la superficie del jugo, garantizando un producto más puro y más claro.

Según literatura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es recomendable que la temperatura del jugo se eleve entre 1.5 y 2.5 °C/min para que el efecto combinado de temperatura, tiempo de clarificado y el floculante o aglutinante (en caso lo haya), permitan la aglomeración de las impurezas. Es importante indicar que después del clarificado los tiempos de residencia deben de ser de 1.5 a 2 horas.

1.2.6.1 Neutralización de los jugos

Uno de los factores importantes de controlar en el proceso de elaboración de la panela es el grado de acidez de los jugos. Para poder medir este factor se hace uso del pH (de 0 a 7 solución ácida y de 7 a 14 solución básica). El objetivo es trabajar con un pH neutro (7), que evite el desdoblamiento o inversión de la sacarosa en azúcares reductores (glucosa y fructuosa) y que, al mismo tiempo, no destruya los azúcares reductores presentes, pues esto origina compuestos que oscurecen la panela.

1.2.7 Evaporación y concentración⁶

Al terminar la limpieza del jugo de la caña de azúcar, se procede a evaporar el agua contenida en éste; lo que a su vez hace que la concentración de azúcares aumente hasta llegar a un contenido de sólidos solubles aproximado de 70° Brix, lo que se recibe el nombre mieles.

Esta operación se efectúa en depósitos metálicos en los módulos paneleros pequeños o en un tren de 3 a 4 pailas en los más grandes. El tren de pailas, permite una mayor eficiencia energética y hace que los tiempos de residencia sean menores aumentando así, la producción y los ingresos de los productores.

En la fase de concentración, el jugo ya evaporado es concentrado, a través de una mayor evaporación de agua. La diferencia en esta etapa es la poca cantidad de jugo con que se trabaja y la agitación constante del mismo para evitar que la sacarosa se pegue en las paredes de la paila.

⁵ La cachaza es la capa de naturaleza coloidal con un 20% de materia seca, compuesto por sacarosa, azúcares reductores, algo de ceniza y proteína que se va formando en la superficie del jugo de la paila clarificadora.

⁶ Este apartado ha sido elaborado utilizando la referencia **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

1.2.8 Punteo

Esta parte del proceso consiste en la evaporación casi total del agua. Con lo que se logra la mayor concentración de los sólidos llegando a valores mayores a los 90 °Brix. Esta etapa de la fabricación de la panela persigue la obtención del “punto⁷” (ver figura 1.6). Un indicativo técnico es la temperatura de ebullición de las mieles, la cual debe de alcanzar aproximadamente de 127°C para panela granulada. Esta temperatura puede variar hasta 2°C, por efecto de la altura sobre el nivel del mar y la pureza de las mieles.

En los módulos paneleros, por la falta de instrumentos de control, se recurre a la observación de ciertas características como la viscosidad y adherencia de las mieles **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 1.6. Punto caramelo obtenido en las pailas punteadoras



1.2.9 Cristalización y enfriamiento

Esta etapa se realiza mediante el batido de las mieles, una vez que éstas han alcanzado el punto panela son retiradas de la hornilla, se agitan en un recipiente llamado batea o bunque, mediante paletas de acero inoxidable. El objetivo de este proceso, es cambiar la textura y estructura a las mieles, al mismo tiempo que se les hace perder su capacidad de adherencia logrando la cristalización de los jugos. La forma de la azúcar orgánica luego que se ha enfriado tiene diferentes presentaciones: cuadrada, redonda, granulada.

En los procesos de producción artesanal de panela juegan un papel muy importante los trabajadores encargados de la regulación y el control de la hornilla, pues su destreza para alimentar la hornilla con combustible (bagazo), así como hasta obtener el “punto”, dependen en gran medida de su conocimiento del oficio.

⁷ Mieles con las características idóneas para pasar a la siguiente fase del proceso. Para el caso de panela granulada es cuando se obtiene una concentración entre 95 y 96 °Brix.

1.2.10 Tamizado

El único caso en el que es necesaria esta etapa es en la producción de panela granulada, el proceso consiste en que después que se ha realizado el batido, se realiza un tamizado de la panela logrando unos granos uniformes. Los residuos del tamizado son reprocesados y llevados a la etapa de evaporación.

1.3 Buenas Prácticas Agrícolas (BPA)

En este apartado se mencionan brevemente, el conjunto de sugerencias que se brindan a los productores para llevar a cabo un correcto cuidado de los recursos naturales con los que cuenta, es decir una correcta gestión del producto durante su ciclo de vida.

Las BPA no se consideran obligatorias para el productor de panela, sin embargo, son útiles en un mercado (internacional y local) en el que cada vez se busca mayor calidad en los productos. El objetivo de aplicar estas BPA es ofrecer al consumidor un alimento sano, de alta calidad y seguro, esto a su vez conlleva que el productor tenga mayores posibilidades de venta y mejores precios.

Con el uso de las BPA, también se *cuida el medio ambiente*, lo que permite conservar la biodiversidad y valorizar recursos naturales como el suelo y el agua. El cuidado del medio ambiente beneficia al productor ya que evita la pérdida de la fertilidad de los suelos, disminuye la contaminación de aguas y suelo, etc. El conjunto de estos factores le permiten mejorar su productividad a lo largo del tiempo.

El uso de BPA, significa que el productor tenga que invertir tiempo y dinero, en la adopción de técnicas para mejorar la higiene, seguridad y aplicación de agroquímicos, manejo durante la cosecha, etc.

Debido a la importancia de las BPA, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) difunde, capacita y colabora en su adopción.

Las BPA se pueden definir como un conjunto de normas, principios y recomendaciones técnicas aplicadas a las diversas etapas de la producción agrícola, cuyo objetivo es ofrecer un producto de elevada calidad e inocuidad con un mínimo impacto ambiental, con bienestar y seguridad para el consumidor y los trabajadores y que permita proporcionar un marco de agricultura sustentable, documentado y evaluable.

1.3.1 Ventajas de la utilización de BPA

- Se mejora las condiciones higiénicas de la panela.
- Se eliminan residuos tóxicos, se cuida que no haya cambios en el sabor y aspecto del producto, lo que disminuye considerablemente las posibilidades de rechazo del consumidor.
- Implementación de normas de higiene y recolección de la cosecha, permitiendo la disminución de fuentes de contaminación de los productos.
- Mejora las posibilidades de ingresar a mercados más exigentes.
- El personal se compromete más con la empresa, ya que el uso de las BPA permiten que se especialicen; y ayudan a que su trabajo se vea más dignificado.
- Al mejorar el producto, también mejora la imagen de la empresa que lo fabrica.

1.3.2 Filosofías de las BPA

A. Protección del ambiente

Reducción o eliminación en la aplicación de agroquímicos y uso y manejo correcto de estos. De esta manera, no se contaminan ni suelos ni aguas y se cuida la biodiversidad.

B. Bienestar y seguridad de los trabajadores

Se buscan buenas condiciones en los lugares de trabajo. Se capacita y cuida la salud, etc.

C. Alimentos sanos

El hecho que los alimentos están libres de contaminantes, lo que le da garantía al consumidor.

D. Organización y participación de la comunidad

Al ser un proceso participativo, entre los involucrados se debe buscar el poder llegar a una sostenibilidad por medio de un uso racional de los recursos, del fortalecimiento de las capacidades de los involucrados y del uso de modelos apropiados de gestión del módulo.

E. Comercio justo

Al agruparse los productores cuentan con poder de negociación, de esta manera pueden lograr tener una retribución justa por su participación en el proceso de producción.

1.4 Hornilla panelera

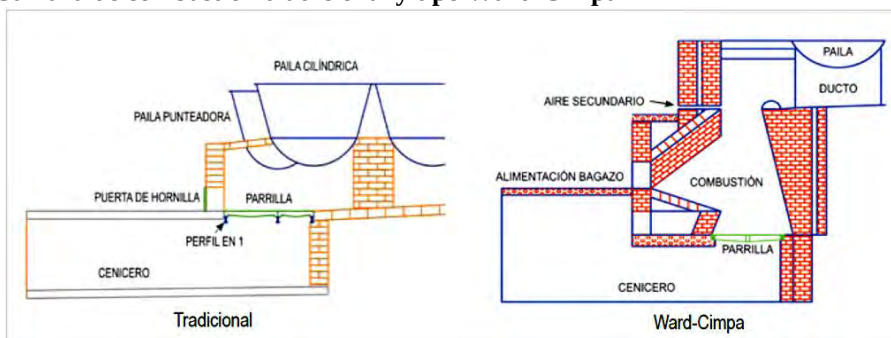
Es el componente principal del módulo encargado de transformar la energía química obtenida de la combustión directa de la biomasa (bagazo) en energía térmica, para evaporar el agua contenida en los jugos de la caña hasta obtener la panela.

1.4.1 Cámara de combustión

Es una cavidad donde se quema el bagazo y demás combustibles empleados en la fabricación de panela (ver figura 1.7). Consta de:

- *Boca de alimentación:* apertura por donde el operario introduce el bagazo a la cámara de combustión.
- *Parrilla:* sirve como lecho al bagazo permitiendo la entrada del aire necesario para la combustión y el paso de cenizas.
- *Cenicero:* ubicado directamente debajo de la parrilla. Su función es almacenar cenizas que se generan durante la quema del bagazo. Además canalizar y precalentar el aire para la combustión.

Figura 1.7. **Cámara de combustión tradicional y tipo Ward-Cimpa**



Fuente: Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

1.4.2 Ducto de gases

La función del ducto de gases (ver figura 1.8) es guiar los gases de combustión y ponerlos en contacto con las pailas para transferir parte de su energía térmica a los jugos. El ducto lo constituyen las paredes, muros de soporte, piso y arcos.

Los ductos han evolucionado desde los más tradicionales que son una excavación realizada directamente en el sitio de construcción de la hornilla y donde las pailas se colocan soportadas por muros y arcos de adobe, hasta aquellos donde las partes que lo constituyen se construyen de material refractario. Se deben diseñar y dimensionar teniendo en cuenta las necesidades de producción, su geometría depende del tamaño y tipo de pailas que se utilizarán.

Figura 1.8. **Ducto de humos**



Fuente: Elaboración propia

1.4.2.1 Pailas

Las pailas o fondos son vasijas o recipientes fabricados en lámina de hierro galvanizado, aluminio o acero inoxidable que reciben los jugos y les transfieren el calor necesario para realizar la clarificación, evaporación y concentración.

Las pailas se seleccionan de acuerdo a las necesidades de producción de la azúcar orgánica y la función que van a desempeñar: evaporación, clarificación o concentración.

A continuación se mencionan los distintos tipos de pailas.

A. Paila semicilíndrica

Las pailas semicilíndricas⁸ (ver figura 1.9) se utilizan cuando el paso de los jugos se hace manualmente. Tienen la ventaja que a igualdad de área de transferencia de calor que una paila tipo plana, reducen el ancho de la hornilla. Se ubican en la zona de mayor temperatura de la hornilla.

Figura 1.9. **Paila semicilíndrica**



Fuente: Elaboración propia

B. Pailas semiesféricas

Las pailas semiesféricas (ver figura 1.10) de igual manera a las anteriores, se utilizan cuando el paso de los jugos se hace manualmente y en la parte final de la evaporación y concentración. Además, se emplean cuando la relación entre el área de transferencia de calor y el volumen de la paila es baja y el traslado manual de los jugos no requiere grandes esfuerzos humanos.

Figura 1.10. **Paila semiesférica**



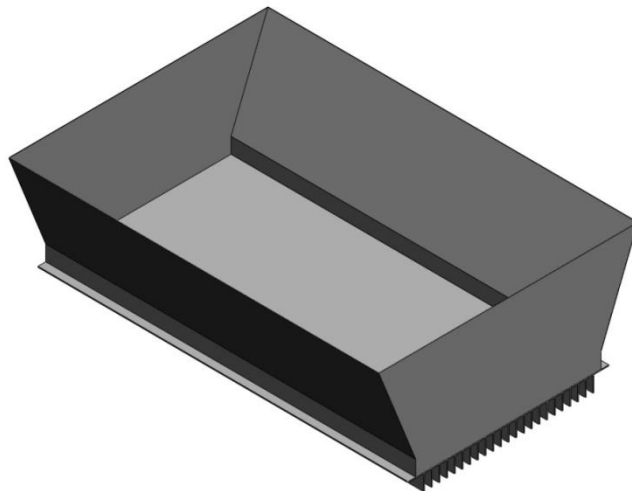
⁸ Las falcas de este tipo de pailas es un tronco de pirámide, el cual se encuentra abierto en su base mayor y su base menor se une al fondo del semicilindro.

Fuente: Elaboración propia

C. Pailas planas y planas aleteadas

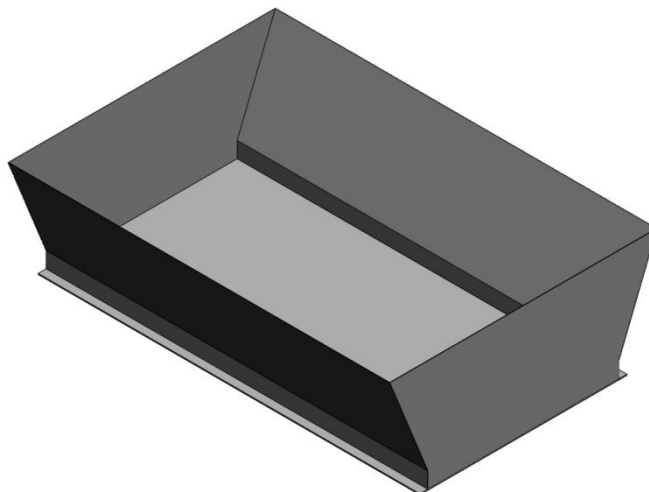
Las pailas planas aleteadas (ver figura 1.11) son más eficientes que las pailas planas (ver figura 1.12) a bajas temperaturas. Presentan mayor relación del área de transferencia de calor con respecto al área plana. Permiten obtener hornillas relativamente más pequeñas. Este tipo de intercambiadores se construyen agregando estas superficies extendidas (aletas) a las pailas planas. Hay que tener en cuenta que se tiene que hacer un cálculo para determinar las dimensiones y el número de aletas para obtener rendimientos óptimos. Se suelen ubicar en las zonas de baja temperatura de la hornilla donde se requiere mayor área de transferencia para asegurar el flujo de calor requerido.

Figura 1.11. **Paila plana aleteada**



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.12. **Paila plana**



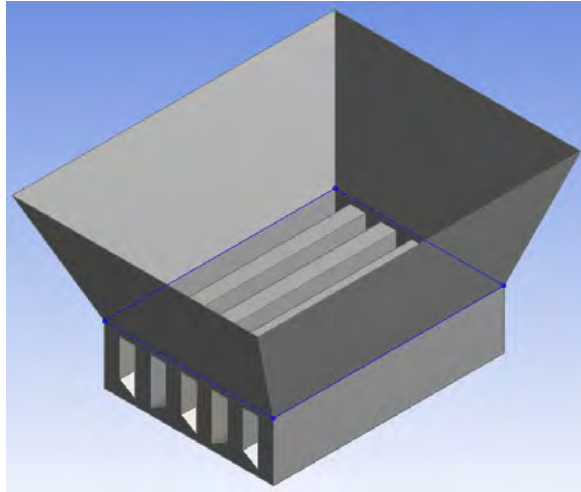
Fuente: Elaboración propia

D. Pailas pirotubulares

Al igual que la paila aletada, el uso de las pirotubulares (ver figura 1.13) se limita a la primera parte de la etapa de evaporación por ser más eficientes en las zonas de menor temperatura de la hornilla donde el mecanismo de transferencia de calor dominante es la convección. Su mayor relación área de transferencia – volumen permite tener una paila de menor longitud en

comparación de las pailas planas aleteadas y planas a igualdad de flujo de calor y tiempo de residencia.

Figura 1.13. **Paila pirotubular**



Fuente: Yépez **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

1.4.3 Chimenea

Es el ducto que conduce a los gases de combustión hacia la atmósfera. Su función es crear el tiro⁹ necesario para la combustión del bagazo y el transporte de los gases a través del ducto de humos. Su forma puede ser cilíndrica, trapezoidal o cónica. Además, sus dimensiones dependen de la forma y del tamaño de la hornilla.

1.5 Impactos de la producción de panela granulada

Los impactos de esta actividad agroindustrial, se pueden dividir en los siguientes:

1.5.1 Impactos ambientales

En una hornilla diseñada correctamente la combustión y la transferencia de calor se realizan de manera más eficiente. Por lo tanto, la cantidad de bagazo que se quema para proporcionar la energía requerida en el proceso será mínima, lográndose que la hornilla sea autosuficiente. La combustión de un menor flujo de bagazo produce una menor cantidad de gases de combustión que tendrá un menor impacto en el ambiente.

La autosuficiencia de combustible de la hornilla significa que el bagazo húmedo que se obtiene durante la molienda será suficiente para el proceso, sin necesidad de recurrir a otros combustibles entre ellos la leña. Por lo tanto, la autosuficiencia de combustible no contribuirá en la deforestación.

⁹ Diferencia de presión necesaria para que los productos de combustión fluyan desde la cámara de combustión hasta la salida de la chimenea.

1.5.2 Impactos económicos y sociales

En el plano socioeconómico los impactos económicos y sociales de la agroindustria panelera se pueden enumerar de la siguiente manera:

- El impacto sobre la mejora de la calidad de vida por el aumento de los ingresos económicos, teniendo un impacto sobre la reducción de la pobreza.
- En situación precedente y actual en algunas zonas, la caña de azúcar se usaba para producir un alcohol artesanal (cañazo, aguardiente) el cual se comercializaba entre los pobladores, en cambio, con la agroindustria panelera, la caña de azúcar que antes se utilizaba para esta práctica se emplea ahora para la producción de panela, obteniéndose un mejor precio y reduciendo el alcoholismo en la zona.

Capítulo 2

Modelos matemáticos

1.1 Modelo matemático para el flujo de fluidos¹

Este apartado trata acerca de los modelos físicos utilizados en la presente tesis.

Debido a la gran cantidad de modelos disponibles en el programa Ansys-Fluent, en el apartado 1.1.1 sólo se mencionan algunos de ellos.

1.1.1 Modelos matemáticos en Ansys Fluent

1.1.1.1 Generalidades de los modelos físicos en Ansys-Fluent

ANSYS FLUENT ofrece una vasta gama de modelos para la simulación tanto de flujos incompresibles como compresibles, laminares o turbulentos. También se pueden resolver problemas de flujo permanente (*steady*) o transitorio (*transient*). Como ya se comentó Ansys-Fluent tiene una amplia gama de modelos matemáticos para modelar fenómenos de transporte (como transferencia de calor y reacciones químicas) lo que se combina con la capacidad de modelación en geometrías complejas.

Ejemplos de aplicaciones de Ansys-Fluent incluyen transferencia de calor aplicada en el parque automotor y en turbomáquinas, combustión de carbón pulverizado en calderas, aerodinámica externa, flujo a través de compresores, bombas y ventiladores, o flujos multifase en lechos fluidizados, etc

Un grupo de modelos de gran utilidad son los de flujo multifase (*multiphase flow*). Éstos pueden ser utilizados para el análisis de flujos gas-líquido, gas-sólido, líquido-sólido, y gas-líquido-sólido. Para este tipo de problemas, Ansys-Fluent ofrece los modelos de volumen de fluido (VOF – *Volume of fluid*), mezcla (*mixture*), y los modelos de Euler (*Eulerian models*), así como también el modelo de fase discreta (DPM – *Discrete phase model*). Ejemplos de flujos multifásicos son los flujos de aerosoles, sedimentación, separación y cavitación.

¹ Este apartado ha sido elaborado utilizando la referencia ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Modelos de turbulencia robustos y precisos son un componente vital en las aplicaciones de la mecánica de fluidos computacional, ya que permiten simular el comportamiento de fluidos en campos de velocidades fluctuantes, los cuales se encuentran en una amplia gama de las aplicaciones ingenieriles. En este sentido, Ansys Fluent ofrece una amplia gama de modelos los cuales se mencionan en el apartado 1.1.1.3.

Entre los modelos de transferencia de calor disponibles se encuentran: el de convección natural y forzada, también el conjunto de modelos y sub-modelos relacionados a la radiación. Hay que tener en cuenta que los modelos de radiación pueden ser tomados en consideración en simulaciones complicadas como por ejemplo la combustión.

Una fortaleza particular de Ansys-Fluent es su capacidad para modelar los fenómenos de combustión utilizando una variedad de modelos, entre ellos se encuentran los de disipación de torbellinos (*Eddy dissipation*) y los modelos de funciones densidad de probabilidad. Una serie de otros modelos que son muy útiles para aplicaciones de reacción de flujos también están disponibles, incluyendo combustión de carbón, formación de contaminantes, etc.

1.1.1.2 Ecuaciones de conservación de la masa y la cantidad de movimiento

Para todos los flujos Ansys-Fluent resuelve las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento. Para flujos en los cuales se involucra transferencia de calor o compresibilidad, adicionalmente también se resuelve la ecuación de la conservación de la energía. Para flujos que involucren mezclado de especies o reacciones, se resuelve la ecuación de conservación de especies. Si se utiliza el modelo de combustión no premezclada (*non-premixed combustion*), se resuelve las ecuaciones de la conservación para fracción mezclada (*mixture fraction*). Ecuaciones adicionales de transporte son utilizadas cuando el flujo es turbulento.

Las ecuaciones de conservación utilizadas para el caso en estudio se muestran en el apartado 1.1.2.

1.1.1.3 Modelos de turbulencia

Los modelos de turbulencia se caracterizan por sus campos de velocidades fluctuantes. Estas fluctuaciones mezclan cantidades de transporte como momento, energía y concentración de especies, lo que a su vez causan que estas cantidades de transporte también fluctúen. Debido a que estas fluctuaciones pueden ser de pequeña escala espacial y alta frecuencia, son de elevado costo computacional como para ser directamente simuladas en cálculos ingenieriles prácticos. En cambio, las ecuaciones de gobierno instantáneas (exactas) pueden ser promediadas en el tiempo (*time-average*), en conjunto (*ensemble-average*) o manipuladas de otra manera para disminuir el costo computacional. Sin embargo, las ecuaciones modificadas contienen variables adicionales desconocidas, y por lo tanto necesitan de modelos de turbulencia para determinar los valores de dichas variables.

Los modelos que Ansys-Fluent provee son los siguientes:

- Spalart-Allmaras model
- $k-\varepsilon$ models
 - Standard $k-\varepsilon$ model
 - Renormalization-group (RNG) $k-\varepsilon$ model
 - Realizable $k-\varepsilon$ model
- $k-\omega$ models
 - Standard $k-\omega$ model
 - Shear-stress transport (SST) $k-\omega$ model
- Transition $k-k_l-\omega$ model
- Transition SST model
- v^2 -f model (add-on)
- Reynolds stress models (RSM)
 - Linear pressure-strain RSM model
 - Quadratic pressure-strain RSM model
 - Low-Re stress-omega RSM model
- Detached eddy simulation (DES) model, which includes one of the following RANS models.
 - Spalart-Allmaras RANS model
 - Realizable $k-\varepsilon$ RANS model
 - SST $k-\omega$ RANS model
- Large eddy simulation (LES) model, which includes one of the following sub-scale models.
 - Smagorinsky-Lilly subgrid-scale model
 - WALE subgrid-scale model
 - Dynamic Smagorinsky model
 - Kinetic-energy transport subgrid-scale model

El modelo de turbulencia utilizado para el caso en estudio se muestra en el apartado 1.1.2.

1.1.1.4 Modelos de transferencia de calor

Al flujo de energía térmica de una región a otra se le conoce como transferencia de calor. Los mecanismos de la transferencia de calor son: conducción, convección y radiación. Los modelos más simples son los que involucran conducción y/o convección, mientras que los de convección natural y radiación son más complejos. Dependiendo del problema Ansys-Fluent resolverá alguna variación de la ecuación de la energía teniendo en cuenta el modelo de transferencia de calor elegido. Ansys-Fluent también puede predecir la transferencia de calor en geometrías repetidas periódicamente.

Las ecuaciones de energía utilizadas para el caso en estudio se muestran en el apartado 1.1.2.

1.1.2 Modelos utilizados en el caso estudio

Un paso importante en una simulación es la selección del modelo matemático para describir el flujo del fluido. En este caso, se ha utilizado el sistema de las ecuaciones de Navier-Stokes que consta de las ecuaciones de la conservación de la masa, cantidad de movimiento y de la energía. La ecuación de conservación de la masa se define como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1.1)$$

donde ρ es la densidad del fluido, $\vec{v}$ es el vector velocidad y S_m es la masa añadida a la fase continua a partir de una segunda fase dispersa (por ejemplo, debido a vaporización de gotas líquidas) y cualquier otra fuente definida por el usuario.

La ecuación de la cantidad de movimiento se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (1.2)$$

Donde p es la presión estática, $\bar{\bar{\tau}}$ es el tensor de esfuerzos viscosos, y $\rho \vec{g}$ y $\vec{F}$ son las fuerzas gravitacional y externas al cuerpo por unidad de volumen (por ejemplo, las que aparecen debido a la interacción con fase dispersa), respectivamente. El vector $\vec{F}$ contiene términos dependientes de otros modelos como, por ejemplo, medio poroso y fuentes definidas por el usuario.

El tensor de esfuerzos viscosos $\bar{\bar{\tau}}$ está dado por:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \bar{\bar{I}} \right] \quad (1.3)$$

Donde μ es la viscosidad molecular, $\bar{\bar{I}}$ es el tensor unitario. El segundo término a la mano derecha es el efecto de la dilatación volumétrica.

El modelo de energía, el cual permite colocar parámetros relacionados a la transferencia de energía o de calor en la simulación, se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v}) \right] + S_h \quad (1.4)$$

Donde k_{eff} es la conductividad térmica local efectiva, $\vec{J}_j$ es el flujo de difusión de la especie -j. Los primeros tres términos a la mano derecha de la ecuación (1.4), representan la transferencia de energía debido a la conducción, difusión de las especies y disipación de la viscosidad, respectivamente. S_h Incluye el calor debido a las reacciones químicas y cualquier otra fuente de calor que se haya definido.

Otro modelo utilizado es el de la viscosidad que permite introducir parámetros para flujo laminar y turbulento. Para la simulación de la paila, se ha utilizado el modelo de turbulencia “k-épsilon (2 eqn)”, en el cual, se toma en consideración el flujo turbulento usando el modelo “k-épsilon Standard” que es el más sencillo de los modelos de turbulencia.

La energía cinética de turbulencia (k) y su tasa de disipación (ε) se obtienen a través de las ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (1.6)$$

donde G_k representa la generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes de la velocidad, G_b representa la generación de energía cinética de turbulencia debido a gradientes de fuerza, Y_M representa la contribución de la dilatación turbulenta debido a la compresibilidad. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes, σ_ε y σ_k son los números de Prandtl de turbulencia para ε y k , respectivamente. Por último, los términos S_k y S_ε son definidos por el usuario.

La viscosidad turbulenta μ_t , se calcula de la combinación de κ y ε como se muestra en la ecuación (1.7).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

donde C_μ es una constante

Las constantes del modelo $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_ε y σ_k tienen los siguientes valores²:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.92$$

$$C_\mu = 1.09$$

$$\sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3$$

Estos valores por defecto han sido determinados a partir de experimentos con aire y agua y son los que se han utilizado en la simulación realizada.

² Valores tomados de la referencia **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Capítulo 3

Caso estudio: Paila aleteada

1.1 Programa Ansys-Fluent¹

Ansys-Fluent es una herramienta que tiene amplias capacidades de modelación física. Por tal motivo, este software de diseño y análisis ingenieril ha sido utilizado con éxito en aplicaciones industriales que van desde la modelación del flujo a través del ala de un avión a la combustión en un horno, flujo sanguíneo hasta plantas de tratamiento de agua. La capacidad de este software en la mecánica de fluidos computacional para modelar motores de combustión interna, aero-acústica, turbomaquinaria y sistemas multifase ha permitido un mejor entendimiento del flujo de fluidos a interno de estas máquinas.

1.1.1 Aplicaciones

Las principales aplicaciones de Ansys-Fluent son las siguientes:

- Flujo automoción interno/externo y flujo dentro de cilindros
- Aerodinámica de alta velocidad
- Turbomaquinaria
- Reactores químicos
- Ciclones
- Lechos Fluidizados
- Mallas dinámicas
- etc.

1.1.2 ¿Qué es la Mecánica de fluidos computacional?

La mecánica de fluidos computacional (CFD – Computational fluid dynamics por sus siglas en inglés) es la ciencia que consiste en predecir el flujo de fluidos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados, mediante la solución numérica del conjunto de las ecuaciones de conservación.

- Conservación de masa
- Conservación de la cantidad de movimiento
- Conservación de la energía

¹ Este apartado se ha realizado en base a las referencias ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

- Conservación de especies, etc.

Los resultados de los análisis CFD son relevantes en:

- Estudios para nuevos diseños
- Desarrollo de productos
- Solución de problemas
- Re-diseño

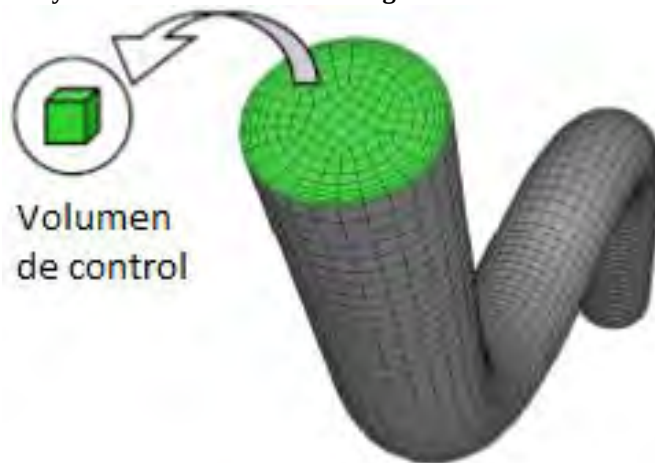
El análisis CFD complementa pruebas y experimentos reduciendo así el esfuerzo y costos requeridos por la experimentación y adquisición de data.

1.1.3 ¿Cómo funciona Ansys-Fluent?

Los solucionadores de Ansys CFD están basados en el método de *discretización espacial de volúmenes finitos*. En el cual sucede lo siguiente:

- El dominio es discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control (ver figura 1.1).
- Las ecuaciones de transporte para masa, momento, energía, especies, etc. Son resueltas en este conjunto de volúmenes de control.
- El sistema de ecuaciones en derivadas parciales son discretizadas en un sistema de ecuaciones lineales.
- El sistema de ecuaciones lineales son resueltas numéricamente para obtener una solución aproximada de la solución real.

Figura 1.1. Discretización y volumen de control de la región de fluido de una tubería

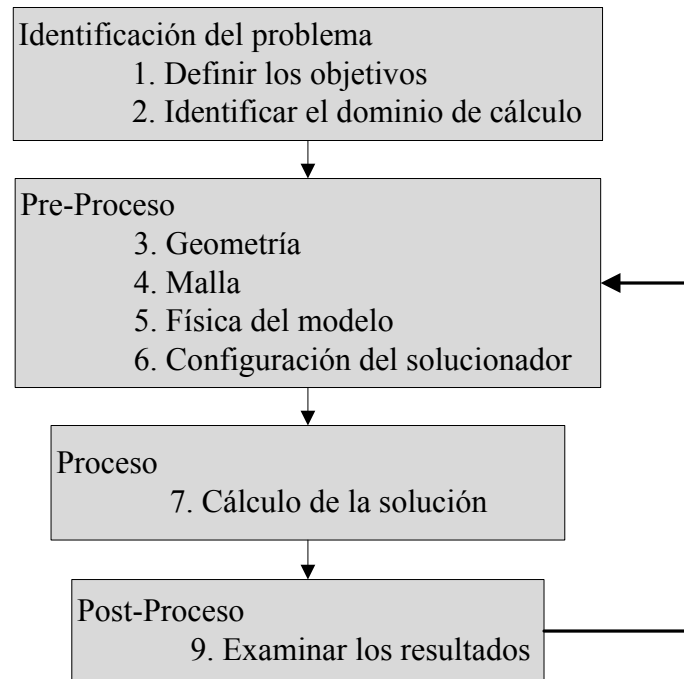


Fuente: Ansys Fluent Workshop **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

1.1.4 Visión general y modelación en CFD

Para realizar una simulación en la que se utilicen técnicas CFD, se debe seguir una serie de pasos. A continuación se mencionan muy brevemente dichos pasos (ver figura 1.2).

Figura 1.2. Pasos a seguir durante una simulación en CFD



Fuente: Ansys Fluent Workshop **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

En los siguientes apartados se explican los puntos a tener en cuenta en cada uno de los pasos mostrados en la figura 1.2.

1.1.4.1 Identificación del problema

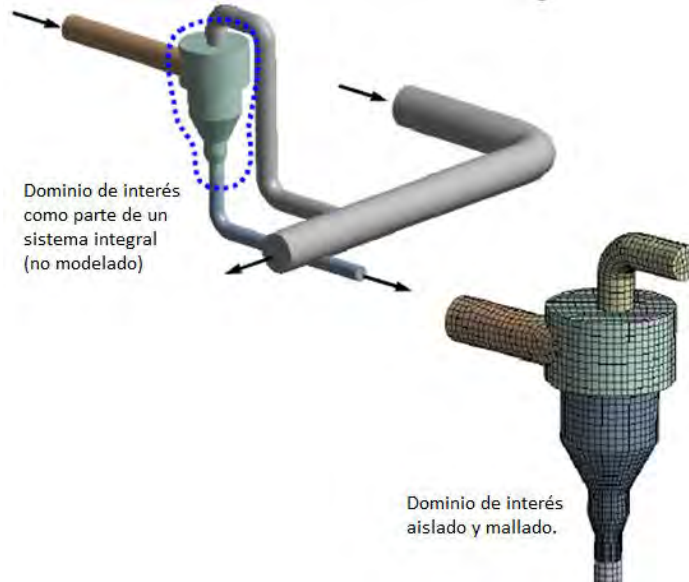
A. Definir los objetivos

- Los modelos físicos que se necesitarán incluir (turbulencia, compresibilidad, transferencia de calor, etc.), en esta parte sólo se decide el modelo, la implementación de los modelos en el programa se hace posteriormente.
- Las hipótesis que serán necesarias hacer tanto para la modelación como también para la solución ya que, por ejemplo, se pueden utilizar condiciones de simetría, periodicidad, etc. Las que, fundamentalmente, se eligen para disminuir el tiempo de cómputo del programa.
- Si se necesitará implementar algún modelo especial, este apartado hace referencia al uso de udfs (*user define functions*). Lo que ocurre es que en el programa Ansys-Fluent se pueden implementar funciones definidas por el usuario, con la finalidad de utilizar otros tipos de modelos que no se encuentran disponibles en Ansys Fluent.
- El nivel de precisión que se requiere, lo cual está directamente relacionado con la capacidad de memoria y el tiempo de simulación.
- La prontitud con que se requieren los resultados.
- Por último, si CFD es la herramienta apropiada.

B. Identificar el dominio de cálculo

- En muchos casos no es necesario simular un sistema global, sino elegir una parte determinada (ver figura 1.3).

Figura 1.3. Definición del dominio de cálculo dentro de un sistema global



Fuente: Ansys Fluent Workshop **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

- Definir el dominio de cálculo. Es importante verificar si se tiene la información necesaria para implementar las condiciones de frontera para la simulación. En caso que no se tenga, analizar si el dominio de cálculo se puede extender a una zona donde se tenga la información.
- Analizar si el modelo se puede reducir, por ejemplo realizar una simulación en dos dimensiones (2D).

1.1.4.2 Pre-proceso

A. Geometría

- Es importante definir: cómo se obtendrá las dimensiones de la geometría, por ejemplo, si se va a obtener la geometría del fluido a partir de un sólido ya existente, qué tipo de software CAD (*Computer-aided design*) se va a utilizar, etc.
- Se puede simplificar la geometría, por ejemplo, removiendo partes complejas de ésta que pueden complicar la tarea del mallado, es decir, remover filetes, pernos, etc. Además, si el dominio de cálculo lo permite, se puede elegir condiciones de simetría o periodicidad, las cuales reducen dicho dominio disminuyendo los tiempos de cálculo y los requerimientos de memoria.

B. Malla

- Según la fenomenología presente en el campo de flujo, se define la densidad de malla que se requiere en cada una de las regiones del dominio. Hay que tener en cuenta que la malla debe ser capaz de capturar gradientes de interés, como por ejemplo: velocidad, presión, temperatura, etc. Hay que poseer la sensibilidad para decidir si la malla será capaz de capturar la fenomenología del caso en estudio.

También es importante tener en cuenta si se requerirá usar mallas adaptativas para mejorar la resolución del problema.

- Hay que elegir la malla más apropiada: en este sentido se debe analizar la complejidad de la geometría del dominio de cálculo y además de elegir el tipo de elementos que se utilizará en el mallado.
- El tiempo de cálculo dependerá de la capacidad de cálculo de la computadora, el número de celdas/nodos y la cantidad de modelos físicos involucrados.

C. Física y configuración del solucionador

En este punto se tiene que definir:

- Las propiedades de los materiales tanto de sólidos, líquidos y gases.
- Los modelos físicos: turbulencia, combustión, multifase, etc.
- Las condiciones de operación (presión y densidad del lugar, etc)
- Las condiciones de frontera (velocidad, flujo másico, presión, simetría, periodicidad, etc.) que serán utilizadas en el modelo.
- Proveer valores iniciales para la primera iteración.
- Los valores para la convergencia de la simulación.

1.1.4.3 Solución

En este apartado se resuelve el sistema de ecuaciones de conservación iterativamente hasta su convergencia.

- La convergencia se alcanza cuando: el cambio en las variables de la solución con respecto a la iteración anterior alcanzan un error o se cumplen un cierto número de iteraciones, en ambos casos definidos por el usuario.
- La precisión de la solución aproximada una vez alcanzada convergencia depende de: la precisión de los modelos físicos elegidos, la resolución de la malla, errores numéricos, etc.

1.1.4.4 Post-proceso

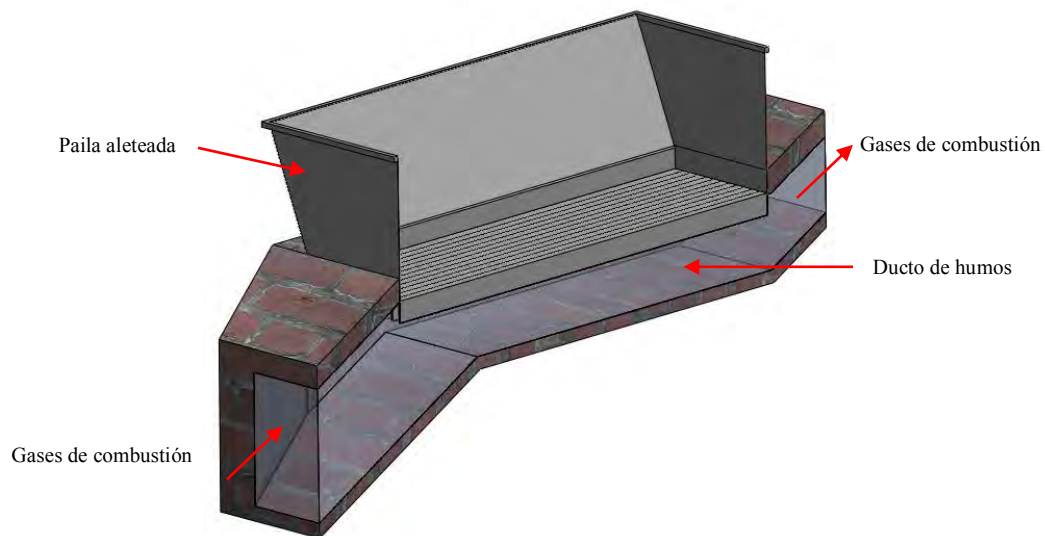
Esta es la parte final y consiste en evaluar los resultados obtenidos para verificar si son representativos de la solución del campo de flujo, de no ser así se debe cambiar las condiciones de frontera y/o los modelos físicos y realizar una nueva simulación.

1.2 Enunciado del problema en estudio

El problema es determinar la potencia térmica transmitida en un intervalo de tiempo a una paila aleteada por los gases de combustión producidos por el quemado del bagazo al jugo obtenido de la molienda de la caña de azúcar.

En la figura 1.4 se muestra un esquema del dominio de cálculo que se utilizará en la simulación. Se aprecian tres elementos: el ducto de humos, la paila aleteada y los gases de combustión, siendo este último el que cede calor al fondo de la paila.

Figura 1.4. Esquema ducto de humos, paila aleteada y gases de combustión



Fuente: Elaboración propia

El esquema mostrado pertenece a la primera paila evaporadora de la hornilla panelera ubicada en la localidad de Santa Rosa de Chonta, distrito de Montero, provincia de Ayabaca, departamento de Piura. El funcionamiento del sistema es el siguiente: los gases de combustión recorren el fondo de la paila (base + aletas), cediendo calor al jugo de la caña de azúcar contenido en la paila, evaporando el agua contenida en el mismo.

El objetivo del presente estudio es predecir y cuantificar la tasa de transferencia de calor para confrontarla con los datos obtenidos en el diseño y experimentalmente, con la finalidad de mejorar la metodología de diseño de pailas para futuros trabajos.

En los anexos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestran planos detallados tanto del ducto como la paila.

Para la simulación se han realizado dos tipos de pruebas:

- **Prueba 1:** Comparación de la tasa de transferencia de calor con datos obtenidos analíticamente y experimentalmente.

En la simulación, se utilizan los datos de temperatura al ingreso de la paila, presión manométrica a la salida (asumida cero) y temperatura del jugo dentro de la paila, para la determinación de la tasa de transferencia de calor para su posterior comparación con datos de diseño y experimentales.

- **Prueba 2:** Cálculo del cambio de la transferencia de calor en función de la altura del fondo de la paila respecto al piso del ducto de humos.

Las condiciones que se utilizan en la simulación son iguales a las mencionadas en el caso anterior. La diferencia es que ahora se trabaja con diferentes alturas del ducto. Las alturas en estudio son: 37, 32, 27, 22 y 17 cm.

1.3 Construcción de la malla²

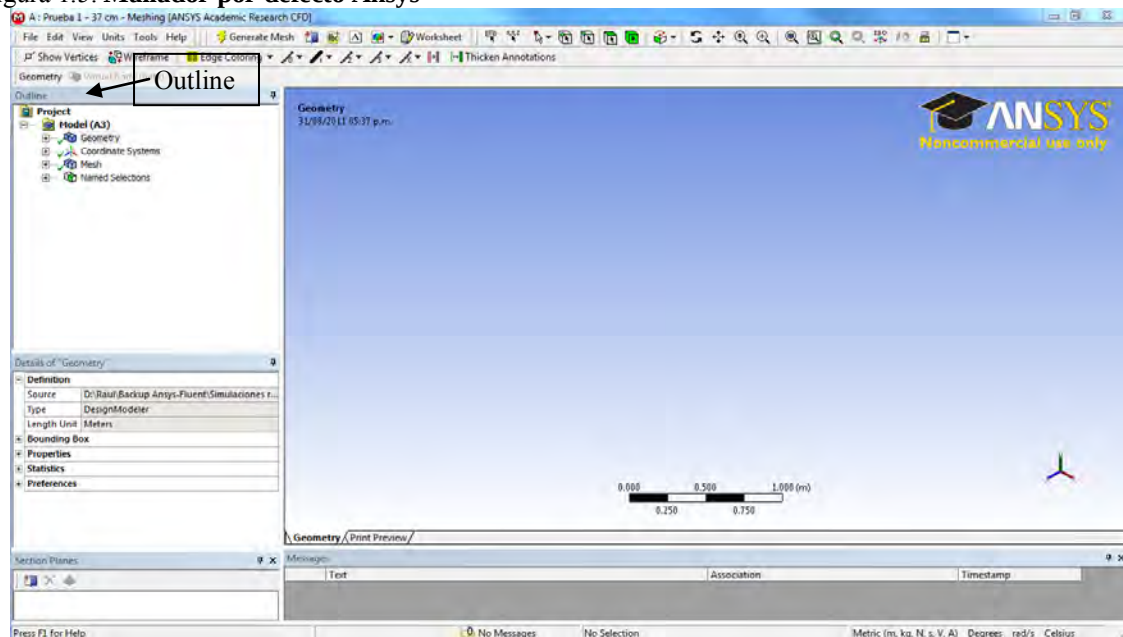
1.3.1 Construcción de la malla utilizando el mallador por defecto de Ansys - Workbench

En la figura 1.5, se muestra la captura de pantalla del mallador. En la barra lateral izquierda hay una pestaña llamada “Outline” en la cual hay una carpeta llamada "Project", seguida por "Model", en cuyo interior hay 4 subcarpetas que son:

- *Geometry*: Indica el nombre de la geometría en estudio.
- *Coordinate Systems*: Indica el sistema de coordenadas Global o en caso haya, también muestra los sistemas de referencia auxiliares.
- *Mesh*: Permite definir los parámetros que se utilizarán en la construcción de la malla.
- *Named selections*: Indica el nombre de las caras de la geometría que serán utilizadas para definir las condiciones de frontera.

Se indica que éstas no son las únicas opciones disponibles, hay otras más pero que no han sido utilizadas en el mallado. En la figura 1.6 se muestra el árbol de dependencias con todas las opciones disponibles.

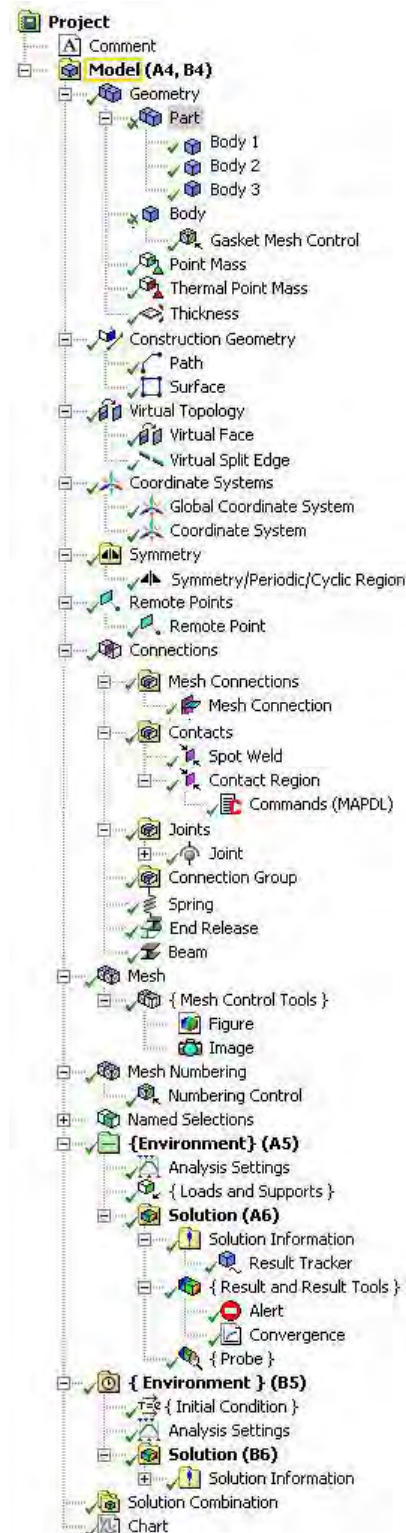
Figura 1.5. Mallador por defecto Ansys



Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Workbench (mallador)

² Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Figura 1.6. Árbol de dependencias

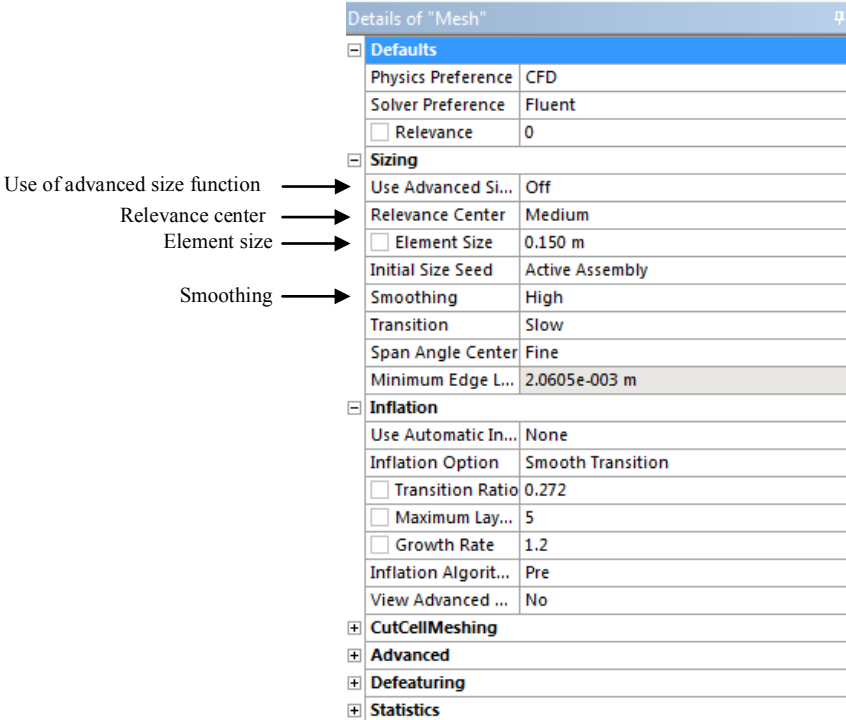


Fuente: Ansys Workbench 12.0. Meshing Help ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Para definir los detalles de la malla se utilizan los parámetros mostrados en la figura 1.7. Algo importante de indicar es que éstos son parámetros generales, que pueden ser modificados en ciertas partes de la malla para mejorar su calidad, en donde sea necesario.

Por lo tanto, se debe utilizar opciones de personalización disponibles en el mallador, las mismas que se mostrarán en este apartado.

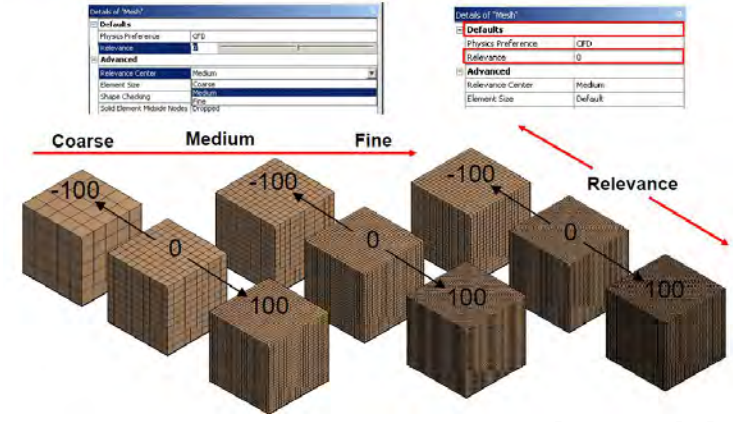
Figura 1.7. Detalles de la malla



Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Workbench (mallador)

- De los parámetros mostrados figura 1.7, los que han sido modificados son los siguientes:
- *Use of Advanced size function*: Cuando este parámetro está desactivado, el mallador utiliza el valor de la propiedad "Element size" para determinar un punto de partida para el cálculo del tamaño de los elementos de la malla.
 - *Relevance center*: Permite definir qué tan fina (*fine*) o gruesa (*coarse*), es la malla. En la figura 1.8 se puede visualizar la diferencia de valores entre *coarse* y *fine*.

Figura 1.8. Detalles de la malla

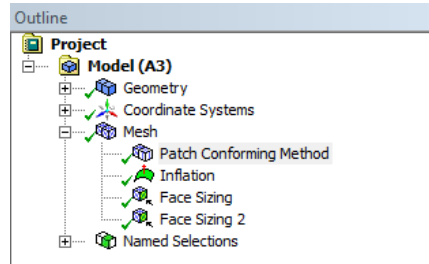


Fuente: Ansys Fluent Workshop **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

- *Element size*: Parámetro utilizado para definir el tamaño de los elementos de la malla.
- *Smoothing*: Se utiliza para obtener una malla más uniforme.

Una vez elegidos los parámetros generales de la malla, se procede a refinarla para obtener los resultados deseados. En la figura 1.9 se muestran las configuraciones efectuadas.

Figura 1.9. **Detalles de la malla**

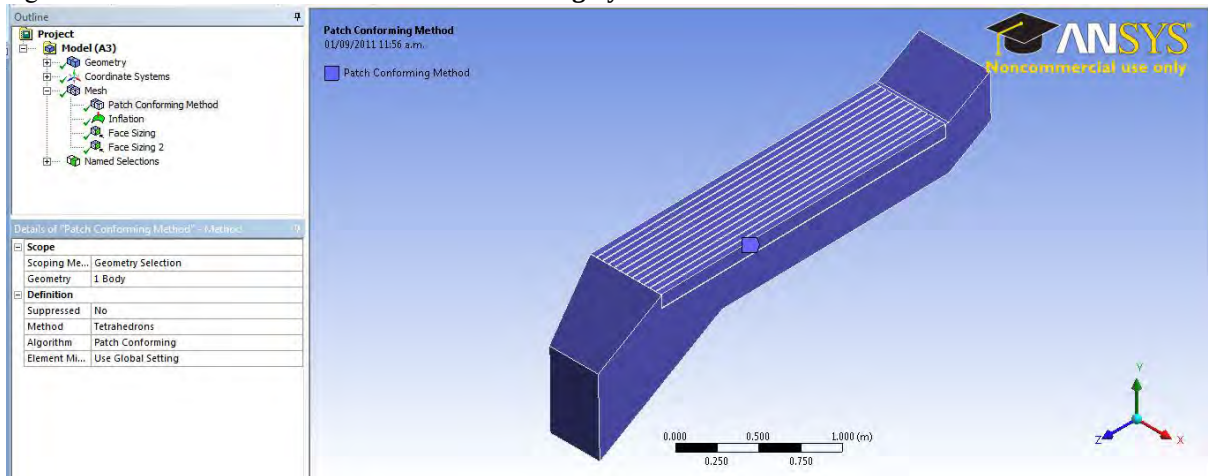


Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Workbench (mallador)

1.3.1.1 Patch Conforming Method

En este método se especifica el tipo de elementos a utilizar, en el caso en estudio se han elegido elementos de tipo tetraedro y además se ha elegido la opción *Patch Conforming*, la que indica que tengan en cuenta los cambios de dirección en la geometría. En la figura 1.10 se muestran las opciones elegidas en este método, además también se aprecia que han sido elegidas todas las caras del sólido.

Figura 1.10. **Detalles del método "Patch conforming" y caras del sólido seleccionadas**

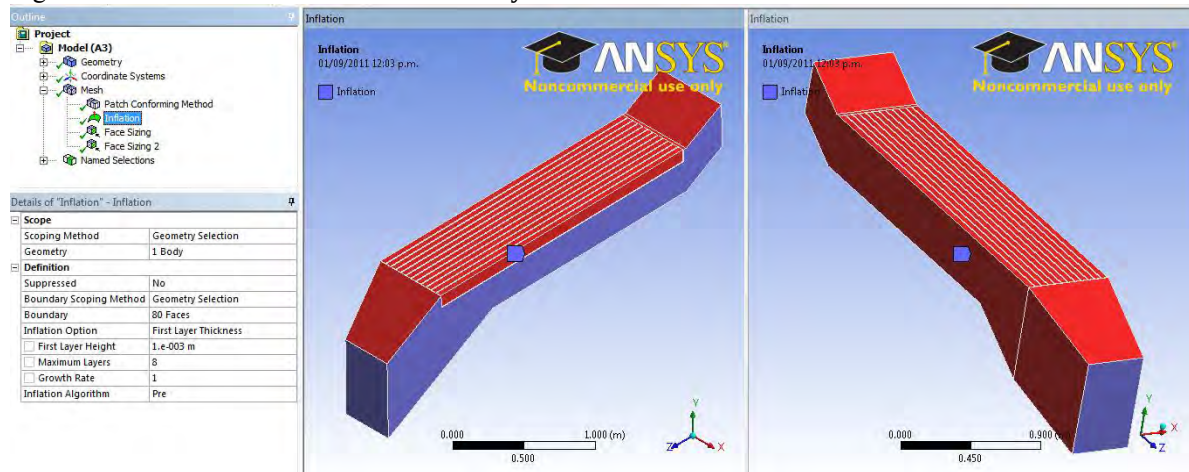


Fuente: Elaboración propia

1.3.1.2 Inflation

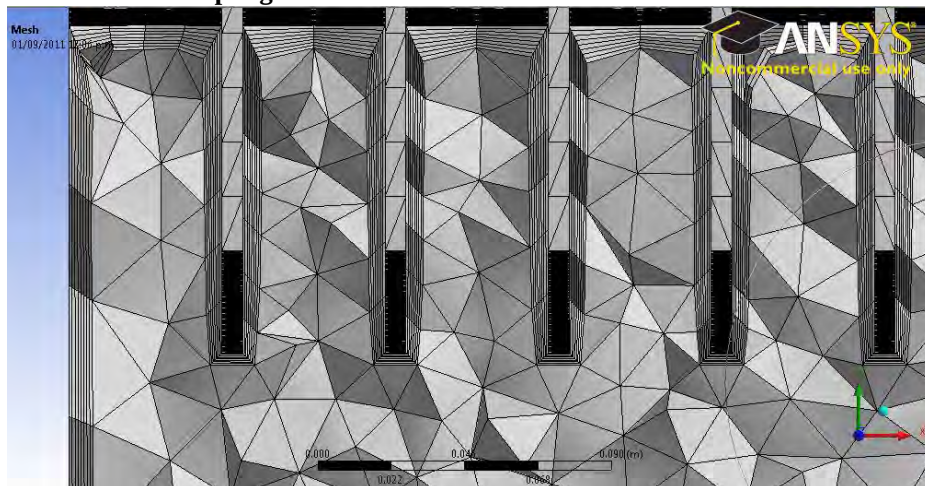
En la figura 1.11 se muestran los detalles de esta opción. Esta configuración se utiliza para tener en cuenta los efectos de capa límite, para lograr esto lo que se hace es refinar la malla en los bordes (ver figura 1.12), para esta simulación se ha elegido el valor de 1 mm como altura de cada una de las capas y el número de capas en 8.

Figura 1.11. Detalles del método "Inflation" y caras del sólido seleccionadas



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.12. Detalles de las capas generadas

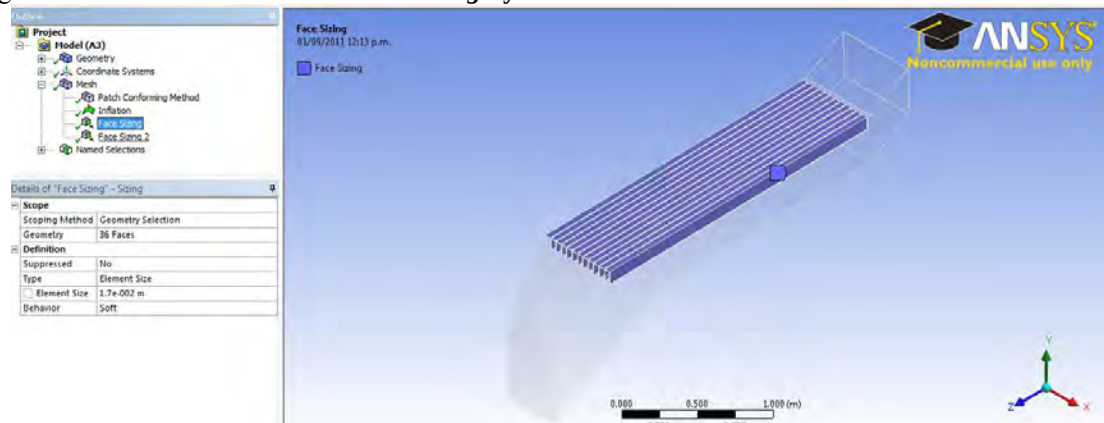


Fuente: Elaboración propia

1.3.1.3 Face Sizing

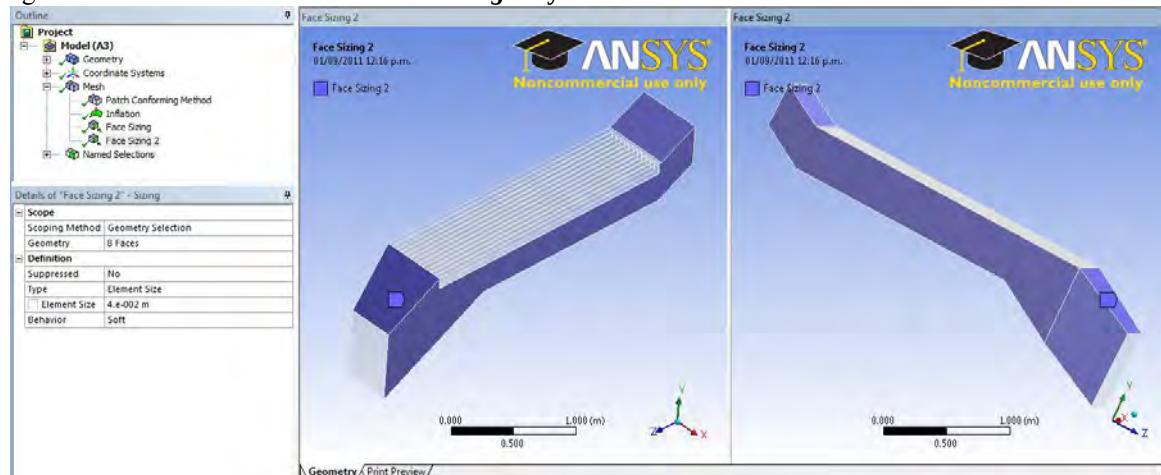
La opción *face sizing* se utiliza para definir el tamaño de los elementos en las caras seleccionadas, para el caso en estudio se ha utilizado dos veces, en las figuras 1.13 y 1.14 se muestran los detalles.

Figura 1.13. Detalles del método "Face sizing" y caras del sólido seleccionadas



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.14. Detalles del método "Face sizing 2" y caras del sólido seleccionadas



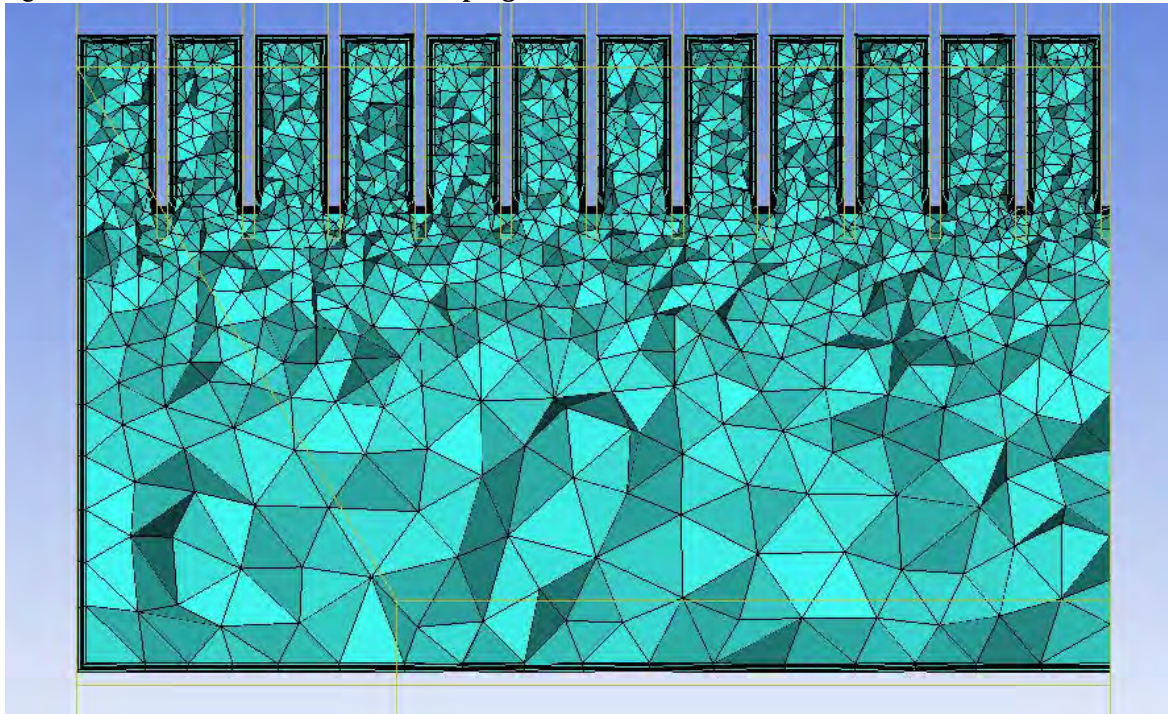
Fuente: Elaboración propia

1.3.2 Construcción de la malla utilizando la herramienta ICEM

Además de la posibilidad que brinda Ansys de realizar la malla utilizando el mallador del Workbench, hay otra opción que es utilizar el mallador ICEM, el cual, es más especializado ya permite mayor control sobre los elementos de la malla.

Durante el desarrollo del presente trabajo también se hizo uso de este mallador, obteniéndose la malla mostrada en la figura 1.15.

Figura 1.15. Malla obtenida utilizando el programa ICEM

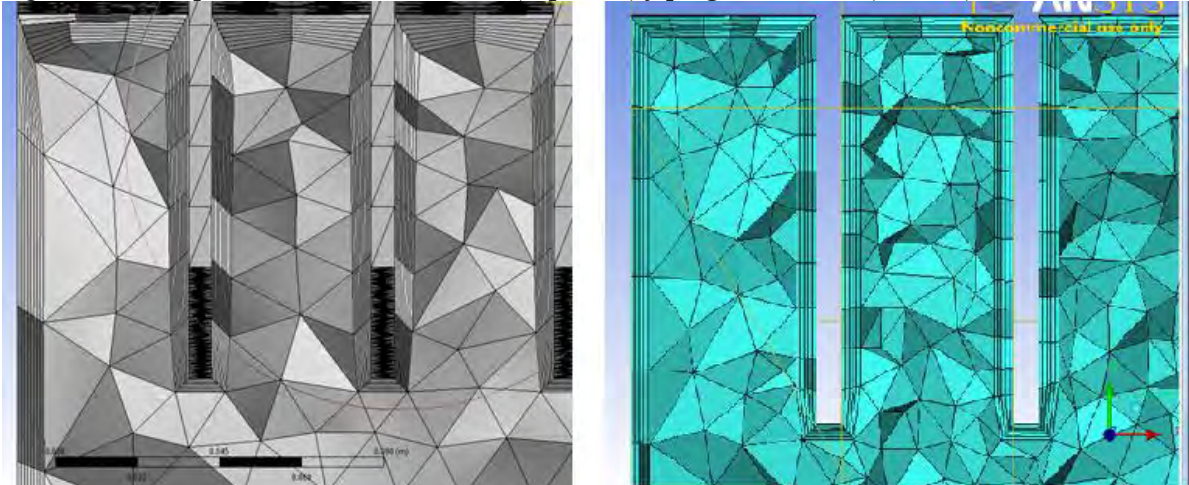


Fuente: Elaboración propia

En la figura 1.16 se muestran tanto la malla obtenida en el Workbench y la obtenida en el programa ICEM, como se aprecia la malla obtenida con el último programa es más uniforme y tiene mayor número de elementos. Sin embargo, en este trabajo se decidió

trabajar con el mallador por defecto de Ansys, debido a que se hizo la simulación con ambas mallas y se obtuvieron resultados muy parecidos, otra razón es que la ventaja de utilizar el mallador de Ansys Workbench, es que el tiempo de cómputo de la simulación es menor.

Figura 1.16. Comparación malla Workbench (izquierda) y programa ICEM (derecha)

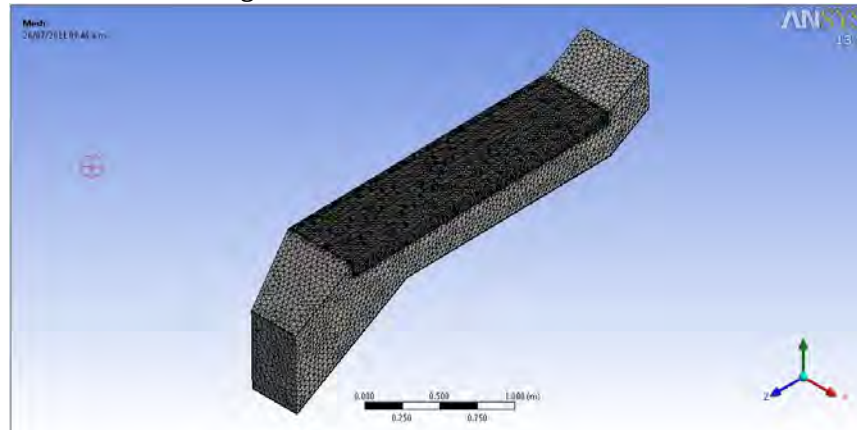


Fuente: Elaboración propia

1.3.3 Malla finalizada

En la figura 1.17, se muestra la malla utilizada para la simulación, los detalles del tipo de elementos, número de elementos y nodos se muestran en la tabla 1.1, cabe mencionar que la geometría del dominio de cálculo utilizada para altura de ducto de 37 cm, es la misma tanto para la prueba 1 como para la prueba 2.

Figura 1.17. Malla utilizada en los gases de combustión



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.1: Datos de las mallas utilizadas

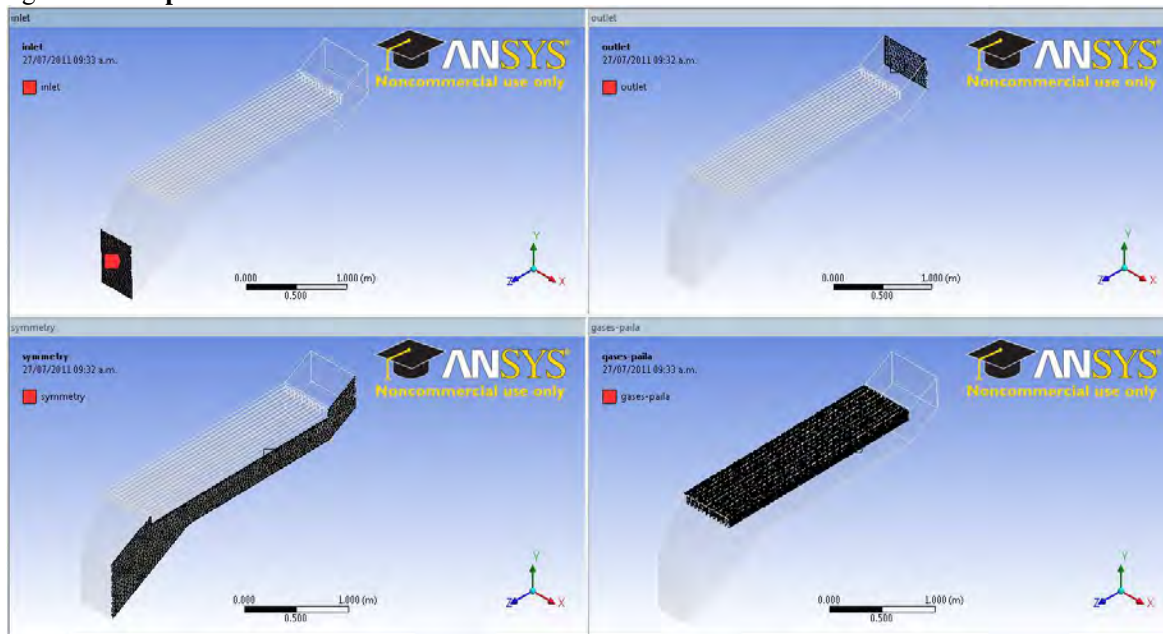
Altura ducto de humos	Tipo de elementos	Número de elementos	Número de nodos
37 cm	Tetraedros	753037	298710
32 cm	Tetraedros	743787	296301
27 cm	Tetraedros	733180	293838
22 cm	Tetraedros	725380	292852
17 cm	Tetraedros	698684	287027

1.3.4 Superficies seleccionas como condiciones de frontera

En la figura 1.18, se indican las secciones utilizadas como condiciones de frontera, las mismas que se detallan a continuación:

- **Inlet**: empleada para especificar la temperatura a la que se encuentran los gases de combustión a la entrada del volumen de control.
- **Outlet**: utilizada para definir la presión manométrica a la salida del dominio de cálculo.
- **Symmetry**: indica que las condiciones en un lado son exactamente las mismas que en el otro lado.
- **Gases - paila**: usada para fijar la temperatura de ebullición del jugo de la caña de azúcar a la presión atmosférica.

Figura 1.18. Superficies seleccionadas como condiciones de frontera



Inlet figura superior izquierda, outlet figura superior derecha, symmetry figura inferior izquierda, wall gases-paila figura inferior derecha.

1.4 Condiciones de frontera

Para cualquier simulación es necesario conocer las condiciones de frontera (BC - *boundary conditions*) a las que el sistema en estudio se encuentra. Las condiciones de frontera se refieren a datos tales como velocidades, presiones, flujos, etc. Dependiendo del tipo se escoge una determinada parte de la geometría **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Para la simulación de la paila aleteada se han utilizado las siguientes condiciones de frontera.

1.4.1 Condición inlet

Este tipo de condición ha sido utilizada para definir el flujo másico a la entrada (*mass flow inlet*) de los gases de combustión. Los parámetros ingresados, son básicamente datos de flujo másico, temperatura y concentración de especies, los cuales pueden ser analíticos o de mediciones. Para el presente trabajo se han utilizado parámetros analíticos (de diseño). Además también se requiere definir la intensidad de turbulencia y el diámetro hidráulico, el procedimiento de cálculo se muestra en el apartado 1.4.1.1.

1.4.1.1 Cálculo de la intensidad de la turbulencia y diámetro hidráulico³

La intensidad de turbulencia es función del número de Reynolds (Re) y se calcula a partir de la expresión (1.1):

$$I = 0.16(\text{Re})^{-1/8} \quad (1.1)$$

El número de Reynolds que es un número adimensional se expresa como

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (1.2)$$

Donde

ρ : Es la densidad del fluido $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

D: Es el diámetro hidráulico $[m]$

v: Es la velocidad $\left[\frac{m}{s} \right]$

μ : Es la viscosidad $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right]$

Para hallar la densidad del fluido se utiliza la expresión

$$\rho = 1.22 \left(\frac{p}{101.325} \right) \left(\frac{T_{\text{amb}} + 273.15}{T_f + 273.15} \right) \quad (1.3)$$

Donde “p” es la presión atmosférica, “ T_{amb} ” es la temperatura ambiente y “ T_f ” es la temperatura del fluido. En la simulación el fluido son los gases de combustión.

El diámetro hidráulico es otro de los parámetros necesarios para calcular el número de Reynolds, pero que además también es uno de los parámetros que se ingresan al programa. Para el caso en estudio, el diámetro hidráulico de la geometría mostrada en la figura 1.19 se determina como:

$$D_h = \frac{4(H_d D - nab)}{D + 2H_d + B + 2na} \quad (1.4)$$

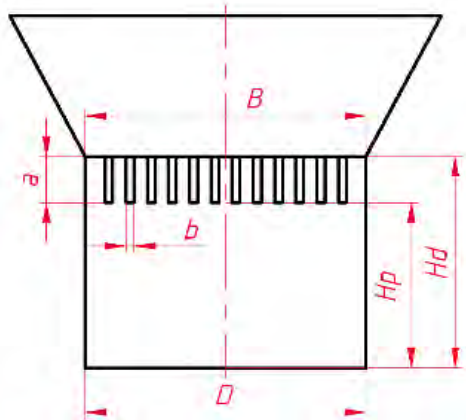
donde n es el número de aletas.

Otro parámetro importante es el área transversal la que se calcula utilizando la expresión (1.5).

$$A_t = H_d D - nab \quad (1.5)$$

³ Este apartado se ha realizado en base a la referencia ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Figura 1.19. Esquema de una paila aletada



Fuente: Tesis Yopez Oblitas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

La velocidad se halla a partir del flujo másico ($\dot{m}$), el área transversal (A_t) y la densidad (ρ).

$$v = \frac{\dot{m}}{A_t \rho} \quad (1.6)$$

Por último, la viscosidad se define como

$$\mu_g = \sum \mu_i \cdot \tilde{\chi}_i \quad (1.7)$$

Donde μ_g es la viscosidad de los gases de combustión, μ_i es la viscosidad del componente -i de la mezcla, la cual se obtiene a través de la Ley de Sutherland, y $\tilde{\chi}_i$ es la fracción molar del componente -i.

$$\mu_i = \frac{\mu_0 \cdot (T_0 + C) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}}{T + C} \quad (1.8)$$

Donde T_0 y μ_0 son la temperatura y viscosidad de referencia, respectivamente, del componente -i, T es la temperatura de los gases combustión y C es la constante de Sutherland del componente -i..

Los valores de temperatura de referencia, viscosidad y constante de Sutherland de cada componente de los gases de combustión se aprecian en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Viscosidad de los componentes de los gases de combustión

Gas	Cte Sutherland (K)	Temperatura T_0 (K)	Viscosidad de referencia (Poise)
O ₂	139	273	1.92E-05
CO ₂	222	273	1.37E-05
H ₂ O (vapor)	1064	350	1.12E-05
CO	136	273	1.66E-05
N ₂	107	273	1.66E-05

Las fracciones molares se encuentran en la tabla 1.3.

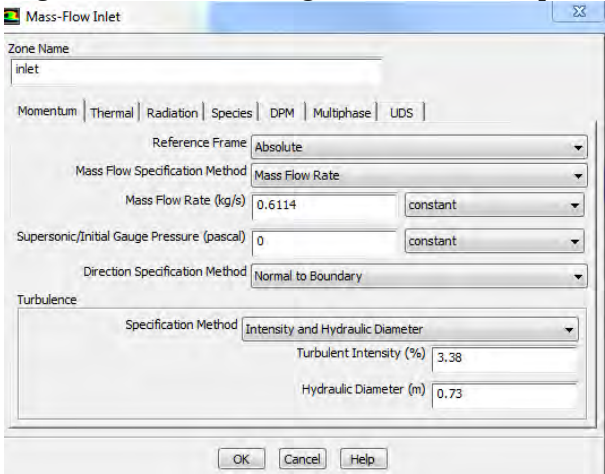
Tabla 1.3: **Fracciones molares**

Fracciones molares				
CO	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O (vapor)
4.2787x10 ⁻⁰²	**	0.6251	8.3737 x10 ⁻⁰²	0.1935
4.2787x10 ⁻⁰²	**	0.6251	8.3737 x10 ⁻⁰²	0.1935
4.2787x10 ⁻⁰²	**	0.6251	8.3737 x10 ⁻⁰²	0.1935
4.2787x10 ⁻⁰²	**	0.6251	8.3737 x10 ⁻⁰²	0.1935
4.2787x10 ⁻⁰²	**	0.6251	8.3737 x10 ⁻⁰²	0.1935

** Esta fracción molar se obtiene restando a 1, la suma de las otras concentraciones

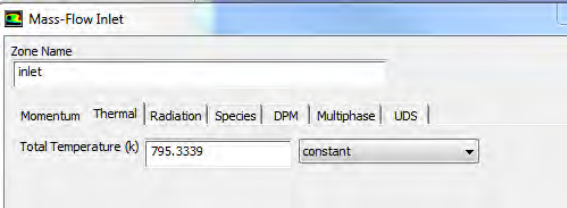
En las figuras 1.20, 1.21 y 1.22 se muestran las pestañas en las cuales se ingresan los parámetros que requiere al programa.

Figura 1.20. **Cuadro de diálogo de la BC *inlet* de los gases de combustión pestaña *momentum***



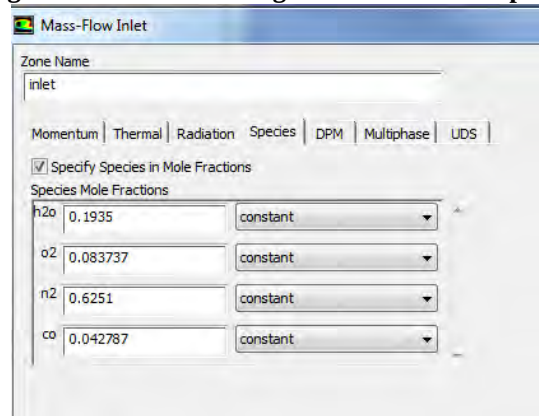
Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Fluent

Figura 1.21. **Cuadro de diálogo de la BC *inlet* de los gases de combustión pestaña *thermal***



Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Fluent

Figura 1.22. Cuadro de diálogo de la BC *inlet* de los gases de combustión pestaña *Species*



Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Fluent

Por último, en la tabla 1.4 se muestra un resumen de los parámetros ingresados en la condición de frontera *inlet*.

Tabla 1.4: **Parámetros condición de frontera *inlet***

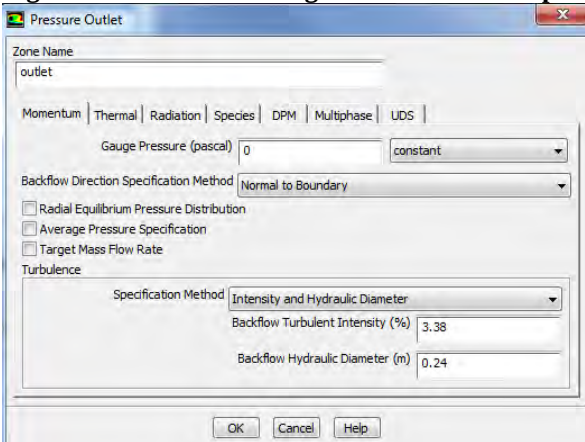
Prueba	Flujo másico [kg/s]	Intensidad turbulencia [%]	Diámetro Hidraulico [m]	Temperatura [K]	Fracciones molares				
					CO	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O vapor
Prueba1 y 2 - 37 cm	0.6114	3.38	0.73	795.33	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935
Prueba2 - 32 cm	0.6114	3.36	0.69	795.33	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935
Prueba2 - 27 cm	0.6114	3.35	0.65	795.33	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935
Prueba2 - 22 cm	0.6114	3.33	0.6	795.33	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935
Prueba2 - 17 cm	0.6114	3.31	0.56	795.33	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935

** Esta fracción molar se obtiene restando a 1, la suma de las otras concentraciones

1.4.2 Condición *outlet*

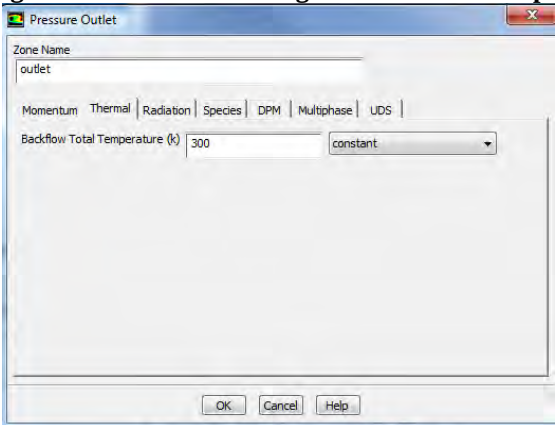
Esta condición ha sido utilizada para ingresar la presión a la salida (*pressure outlet*) del dominio de cálculo de los gases de combustión. En las figuras 1.23, 1.24, 1.25 se muestran los parámetros ingresados, los que son presión manométrica (asumida cero), temperatura y concentración de especies, que son valores de diseño. Además, para hallar la intensidad de turbulencia y el diámetro hidráulico, se ha seguido el procedimiento mostrado en el apartado 1.4.1.1.

Figura 1.23. Cuadro de diálogo de la BC *outlet* de los gases de combustión pestaña *momentum*



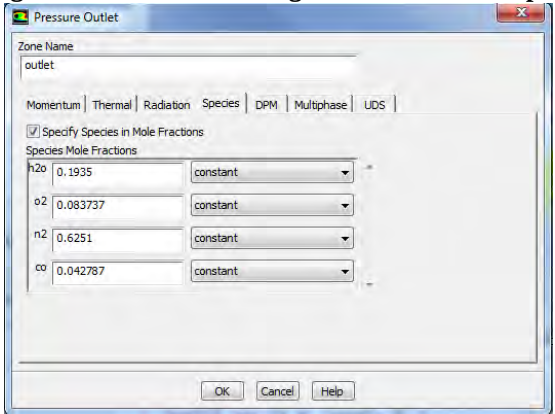
Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Fluent

Figura 1.24. Cuadro de diálogo de la BC outlet de los gases de combustión pestaña *thermal*



Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Fluent

Figura 1.25. Cuadro de diálogo de la BC outlet de los gases de combustión pestaña *Species*



Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Fluent

En la tabla 1.5 se muestra un resumen los parámetros ingresados en la condición de frontera *outlet*.

Tabla 1.5: **Parámetros condición de frontera *outlet***

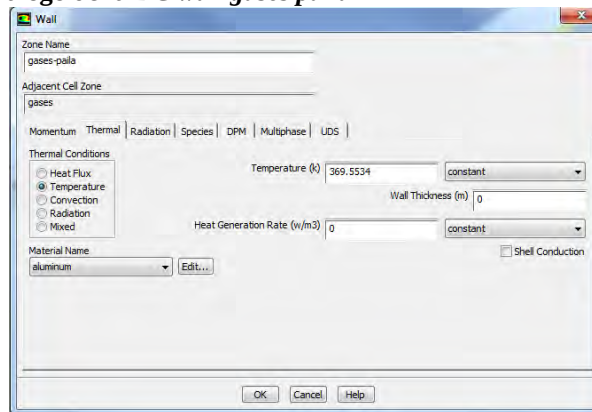
Test	Presión [Pa]	Intensidad turbulencia [%]	Diámetro Hidraulico [m]	Fracciones molares				
				CO	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O vapor
Prueba1 y 2 - 37 cm	0	3.38	0.56	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935
Prueba2 - 32 cm	0	3.36	0.49	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935
Prueba2 - 27 cm	0	3.35	0.41	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935
Prueba2 - 22 cm	0	3.33	0.33	**	5.4885×10^{-02}	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935
Prueba2 - 17 cm	0	3.31	0.24	4.2787×10^{-02}	**	0.6251	8.3737×10^{-02}	0.1935

** Esta fracción molar se obtiene restando a 1, la suma de las otras concentraciones

1.4.3 Condición *wall*

Para esta condición (ver figura 1.26), se ha especificado una temperatura de 369.5534 K, que corresponde a la temperatura de ebullición del jugo de la caña de azúcar a la presión atmosférica de 87.713 kPa.

Figura 1.26. Cuadro de diálogo de la BC *wall gases paila*

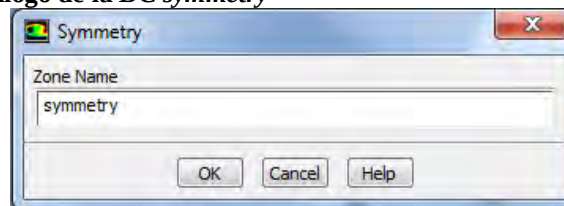


Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Fluent

1.4.4 Condición *symmetry*

Representa una condición de simetría, no requiere el ingreso de ningún parámetro (ver figura 1.27).

Figura 1.27. Cuadro de diálogo de la BC *symmetry*



Fuente: Captura de pantalla, programa Ansys Fluent

Un resumen general de todos los modelos, materiales y condiciones de frontera utilizadas se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Capítulo 4

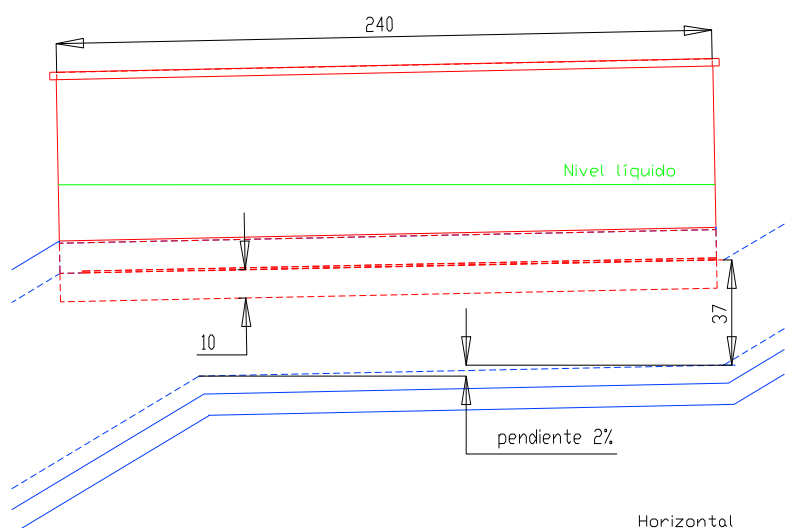
Resultados

1.1 Cálculo de la potencia térmica

El cálculo de la potencia térmica requerida para evaporar parte del agua contenida en el jugo de la caña de azúcar es un parámetro fundamental para poder validar el modelo realizado. Es así, que en este apartado se muestra el procedimiento de cálculo.

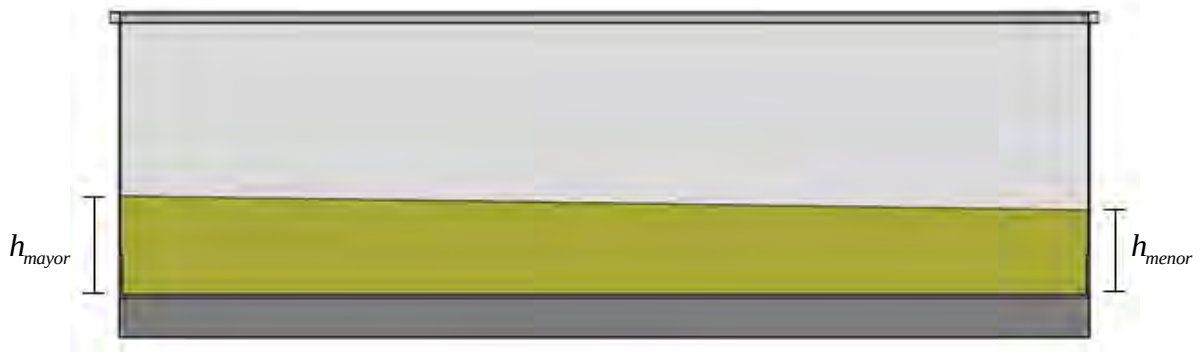
En primer lugar hay que indicar que el fondo de la paila tiene una pendiente de 2% (dos por ciento)¹ como se muestra en la figura 1.1, sin embargo, el nivel del líquido contenido en la paila es paralelo a la horizontal (ver línea color verde), de manera que si se hiciera un corte transversal y se girara de modo que la paila quedara en posición horizontal se obtiene la imagen que se muestra en la figura 1.2.

Figura 1.1. Esquema ubicación paila evaporadora con pendiente 2 %



¹ La pendiente en porcentaje se calcula multiplicando la distancia en vertical por 100 y a éste resultado se divide la distancia horizontal.

Figura 1.2. Corte transversal paila



Fuente: Elaboración propia

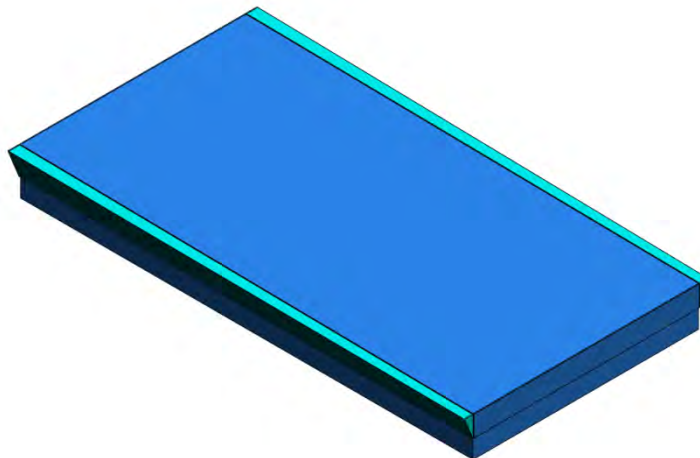
A continuación, se explica el procedimiento para hallar la potencia térmica. En primer lugar, se requiere el flujo másico de agua evaporada, para lo cual primero hay que hallar la diferencia de volumen de jugo dentro de la paila que tiene lugar en un intervalo de tiempo determinado, estos datos se obtienen de mediciones y se pueden completar en una tabla como la 1.1, en donde se colocan las alturas h_{mayor} y h_{menor} (ver figura 1.2) y la hora exacta a la que se hizo la medición.

Tabla 1.1: Tabla de datos a completar para el cálculo de la potencia térmica

	Hora	Paila evaporadora	Paila evaporadora
		h_{menor} [m]	h_{mayor} [m]
Vol. inicial			
Vol. final			
Vol. inicial			
Vol. final			

Para hallar el volumen se divide el contenido de la paila en tres partes (ver figura 1.3). El elemento de color azul corresponde a un prisma trapezoidal y los de color celeste corresponden a troncos de pirámide², con bases triangulares. La suma de los volúmenes de estos elementos corresponderá al volumen de jugo dentro de la paila.

Figura 1.3. Volumen contenido dentro de la paila evaporadora



Fuente: Elaboración propia

² Un tronco de pirámide o también llamado pirámide truncada es un poliedro comprendido entre la base de la pirámide y un plano que corta a todas las aristas laterales.

El volumen del prisma trapezoidal se define como

$$V_{pt} = \frac{1}{2}(h_{mayor} + h_{menor})(l_p)(a_{bp}) \quad [m^3] \quad (1.1)$$

Donde

V_{pt} : Volumen del prisma trapezoidal [m^3]

l_p : Largo de la paila (2.4 m)

a_{bp} : Ancho de la base de la paila (1.2 m)

Para hallar el volumen de las troncos de pirámide, se realiza el siguiente procedimiento.

En primer lugar el volumen de una pirámide es

$$V_p = \frac{Bh}{3} \quad [m^3] \quad (1.2)$$

Donde

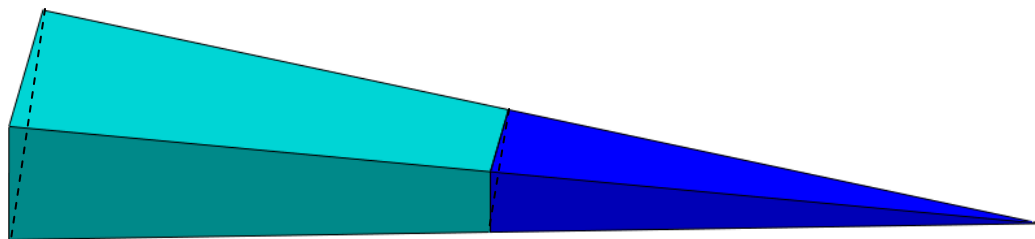
V_p : Volumen de la pirámide [m^3]

B : Área de la base de la pirámide [m^2]

h : Altura de la pirámide [m]

Para hallar el volumen de un tronco de pirámide (elemento color celeste figura 1.4), al volumen de la pirámide 1 (elemento celeste y azul) se le resta el volumen que corresponde a la pirámide 2 (elemento color azul).

Figura 1.4. **Pirámide y tronco de pirámide**



Fuente: Elaboración propia

Para lo cual se utiliza la expresión

$$V_{tp} = \frac{A_1 h_1}{3} - \frac{A_2 h_2}{3} \quad [m^3] \quad (1.3)$$

Donde

V_{tp} : Volumen del tronco de pirámide [m^3]

A_1 : Área de la base de la pirámide 1 [m^2]

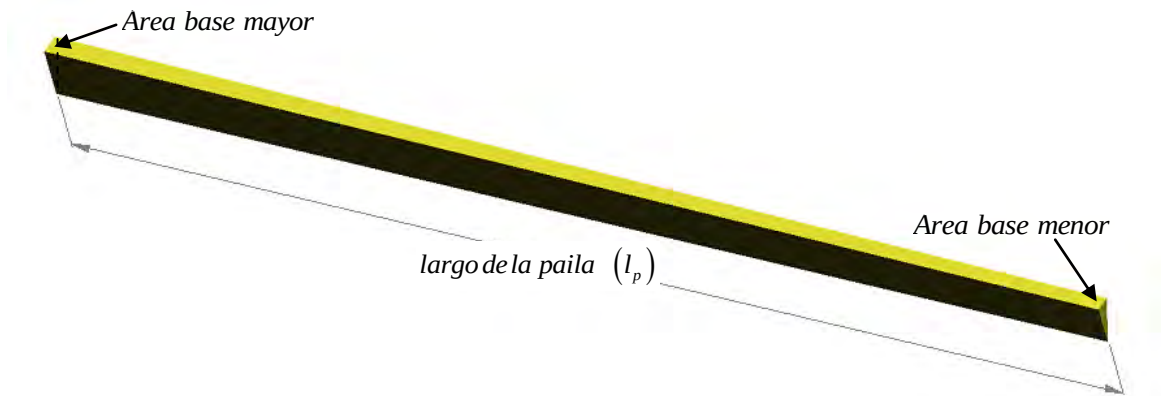
A_2 : Área de la base de la pirámide 2 [m^2]

h_1 : Altura de la pirámide 1 [m]

h_2 : Altura de la pirámide 2 [m]

El tronco de pirámide, del cual se desea hallar el volumen se muestra en la figura 1.5.

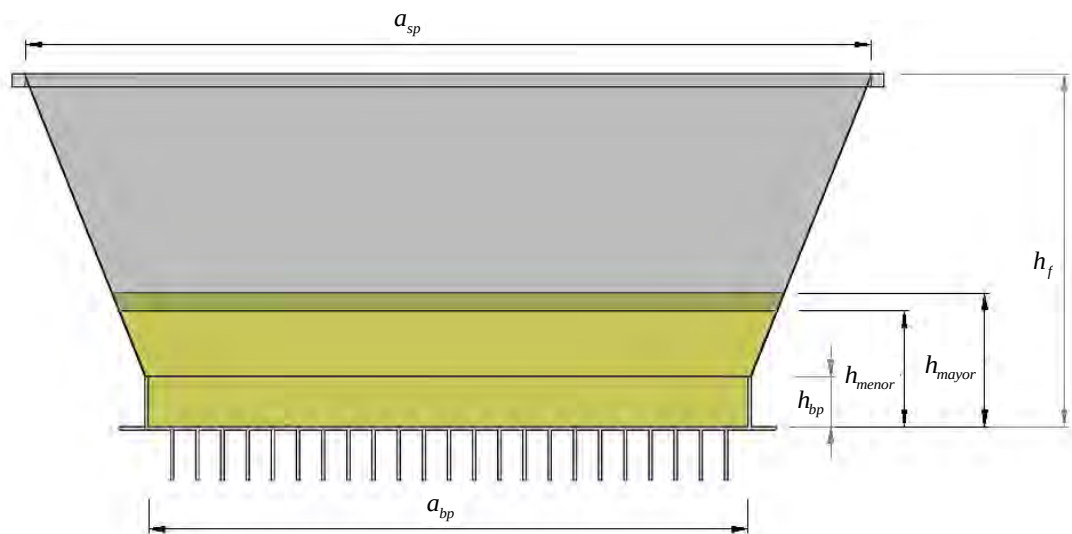
Figura 1.5. Tronco de pirámide del que se desea hallar su volumen



Fuente: Elaboración propia

Para una mejor comprensión en la figura 1.6, se muestra la vista frontal de la paila, la cual se obtiene de girar la figura 1.1, de manera que el fondo de la paila quede en posición horizontal.

Figura 1.6. Vista frontal paila



Fuente: Elaboración propia

Para hallar el área de la base menor (que corresponde a un triángulo), se utiliza la siguiente expresión

$$A_{menor} = \frac{1}{2} h_3 b_3 \quad [m^2] \quad (1.4)$$

Donde

h_3 : Es el resultado de operar $(h_{menor} - h_{bp})$ [m]

h_{bp} : Altura borde perimetral de la paila (0.1 m)

El parámetro b_3 se halla por semejanza de triángulos y es

$$b_3 = \left[\left(\frac{h_{menor} - h_{bp}}{h_f} \right) \left(\frac{a_{sp} - a_{bp}}{2} \right) \right] \quad [m] \quad (1.5)$$

Siendo

h_{bp} : Altura borde perimetral de la paila (0.1 m)

a_{sp} : Ancho parte superior paila (1.68 m)

h_f : Altura de la falca (0.6 m)

De manera que el área de la base menor se calcula como

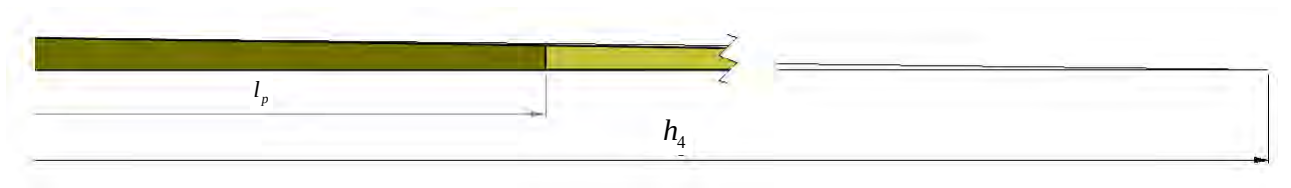
$$A_{menor} = \frac{1}{2} (h_{menor} - h_{bp}) \left[\left(\frac{h_{menor} - h_{bp}}{h_f} \right) \left(\frac{a_{sp} - a_{bp}}{2} \right) \right] \quad [m^2] \quad (1.6)$$

De manera análoga, para hallar el área que corresponde a la base mayor, se utiliza la expresión

$$A_{mayor} = \frac{1}{2} (h_{mayor} - h_{bp}) \left[\left(\frac{h_{mayor} - h_{bp}}{h_f} \right) \left(\frac{a_{sp} - a_{bp}}{2} \right) \right] \quad [m^2] \quad (1.7)$$

Halladas las áreas el único parámetro que falta es la altura h_4 (ver figura 1.7).

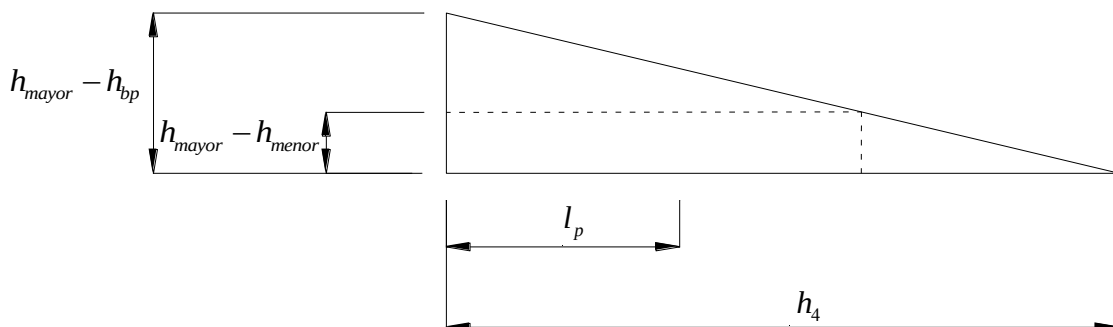
Figura 1.7. **Vista perfil del tronco de pirámide**



Fuente: Elaboración propia

Para una mejor comprensión, en la figura 1.8 se muestra un esquema del tronco de pirámide visto en la figura 1.7.

Figura 1.8. **Esquema vista perfil tronco de pirámide**



Fuente: Elaboración propia

Por semejanza de triángulos, se halla h_4 cuya expresión es

$$h_4 = (h_{mayor} - h_{bp}) \left(\frac{l_p}{h_{mayor} - h_{menor}} \right) \quad [m] \quad (1.8)$$

De manera que la expresión final para el cálculo del tronco de pirámide es

$$V_{tp} = \frac{A_{mayor} h_4}{3} - \frac{A_{menor} (h_4 - l_p)}{3} \quad [m^3]$$

El volumen de jugo se calcula de la siguiente manera

$$V_{jugo} = V_{pt} + 2(V_{tp}) \quad [m^3] \quad (1.9)$$

Con el volumen hallado, se obtiene la masa de agua evaporada:

$$m_j = (V_{jf} - V_{jo}) \rho_j \quad [kg] \quad (1.10)$$

Donde

m_j : Masa de agua evaporada [kg]

V_{jf} : Volumen de jugo final [m^3]

V_{jo} : Volumen de jugo inicial [m^3]

La densidad del jugo³ es $1071.24 \frac{kg}{m^3}$, la que se calcula a partir de

$$\rho_j = 1000 \left(1 + \frac{C_i (C_i + 200)}{54000} \right) \left(1 - 0.036 \frac{T_i - 20}{160 - T_i} \right) \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (1.11)$$

Donde

C_i : Grados Brix del jugo (18 %)

T_i : Temperatura ambiente (25 °C)

Ahora para encontrar el flujo másico, simplemente hay que dividir la masa de agua evaporada entre el tiempo requerido para evaporar dicha masa.

$$\dot{m}_j = \frac{m_j}{\Delta t} \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (1.12)$$

Por último, la potencia térmica se halla multiplicando el flujo másico, por el calor latente

$$\text{de vaporización}^4 \left[2267.61 \frac{kJ}{kg \text{ de agua}} \right],$$

Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en la tabla 1.2, para mayor detalle ver el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

³ Fórmula tomada de la referencia **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

⁴ Valor correspondiente a una presión atmosférica de 87.7179 kPa, tomado de la tabla A5 de la referencia **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 1.2: Datos reales medidos a la salida de la paila

Prueba	Potencia térmica [W]
1	91613.83
2	90267.52
3	87459.14
4	97517.06

1.2 Simulación de la transferencia de calor de la paila aleteada

En esta prueba, se obtuvo una tasa de transferencia de calor de 88619.04 W, mientras que el valor analítico fue 94900 W, obteniéndose así un porcentaje de error de 6.62%; además al compararse con el valor promedio experimental de 91714.36 se obtiene un error de 3.37%.

La temperatura a la salida de la paila, en el caso de la simulación fue de 735.646 K, mientras que en la fase de diseño dio un valor de 740.68 K resultando un porcentaje de error de sólo 0.68 %. Además, también se cuenta con los valores de temperatura medidos (ver tabla 1.3) que tienen como media 764.4 K que en comparación con la temperatura simulada tiene un error de 3.76 %, de manera que se puede concluir que los resultados son bastante satisfactorios. En la tabla 1.4, se muestra un resumen de los resultados y errores obtenidos.

Tabla 1.3: Datos reales medidos a la salida de la paila

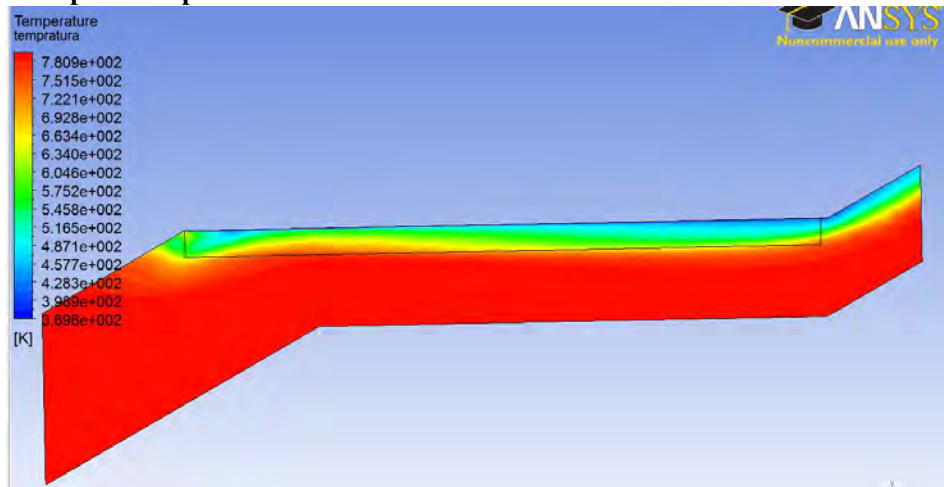
Hora	Fecha	Temperatura [K]
08:26 p.m.	26/11/2010	782.15
09:37 a.m.	27/11/2010	749.15
03:06 a.m.	28/11/2010	746.15
04:59 a.m.	28/11/2010	780.15

Tabla 1.4: Comparación resultados analíticos, experimentales y de la simulación

	Resultado simulación	Dato analítico	Error [%]	Dato experimental	Error [%]
Calor [W]	88619.04	94900	6.62	91714.36	3.37
Temperatura salida [K]	735.646	740.68	0.68	764.4	3.76

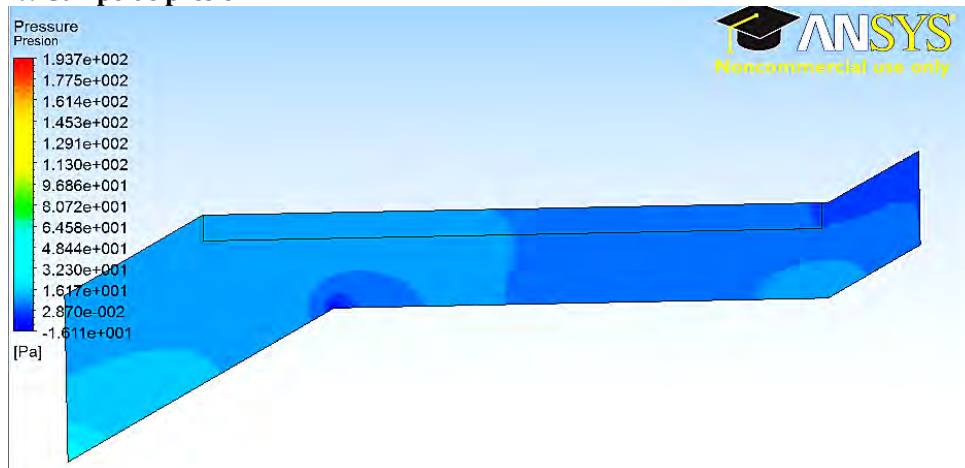
En la figura 1.9 se muestra el campo de temperatura a lo largo del fondo de la paila y el ducto. Como se aprecia, la temperatura de los gases va disminuyendo a medida que éstos se acercan a la paila. Esto se debe a la transferencia de calor entre los gases y la paila.

Figura 1.9. **Campo de temperatura**



En la figura 1.10, se muestra el campo de presión, si bien es cierto la diferencia no es significativa, aún se puede apreciar que el fluido se mueve de mayor a menor presión.

Figura 1.10. **Campo de presión**



En la figura 1.11 se observa el campo de velocidad; se verifica que en la zona cercana al fondo de la paila, la velocidad es menor. Esto se debe a que el fluido disminuye su temperatura debido a la transferencia de calor de los gases de combustión al jugo, lo cual hace que aumente su densidad, y disminuya la velocidad⁵.

En la figura 1.12, se muestra el campo de la densidad. Como se mencionó la densidad se incrementa al aumentar la temperatura, por la ecuación de estado de gas ideal, la cual se puede aplicar debido a que bajo las condiciones de trabajo los gases de combustión se comportan como una mezcla de gases ideales.

⁵ La velocidad es directamente proporcional al flujo másico e inversamente proporcional tanto al área como a la densidad.

Figura 1.11. Campo de velocidad

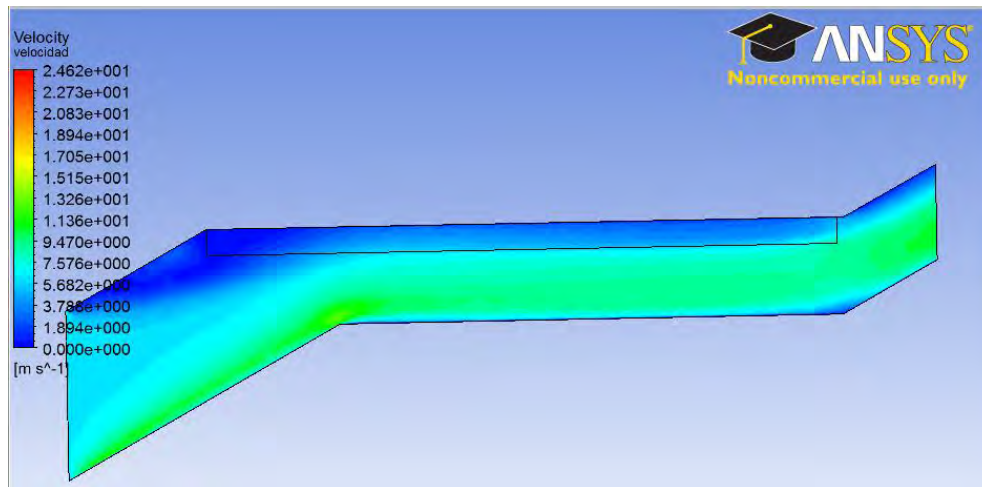
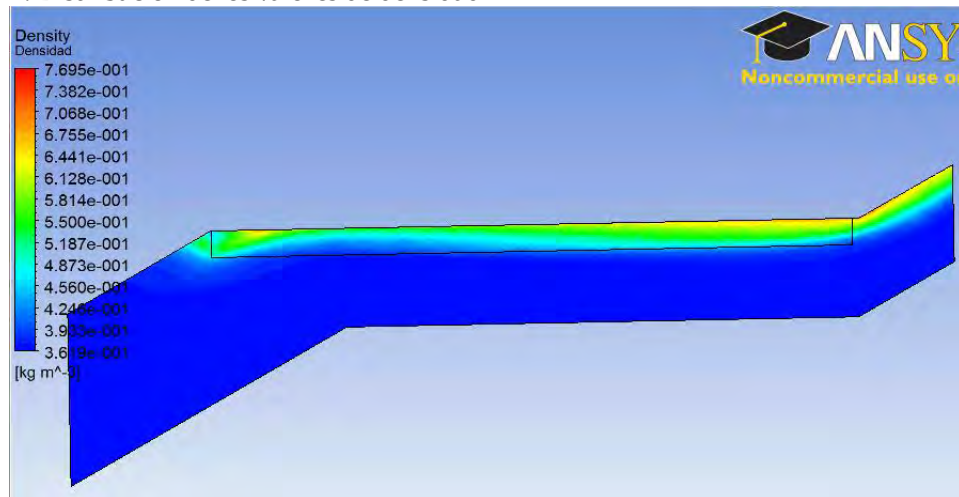


Figura 1.12. Distribución de los valores de densidad



1.3 Simulación de la transferencia de calor de la paila aleteada al variar la altura del ducto

Los datos obtenidos en esta prueba se muestran en la tabla 1.5.

Tabla 1.5: Resultados variando altura del ducto

Prueba	Calor [W]	Temp. salida [K]	Caída de presión [Pa]	Velocidad entrada [m/s]	Velocidad salida [m/s]
Prueba 1 37 cm	88619.04	735.646	15.0305	6.26	8.77
Prueba 2 32 cm	104412.16	725.0498	22.01	6.87	10.15
Prueba 3 27 cm	125039.08	711.20	34.82	7.61	12.135
Prueba 4 22 cm	161441.8	695.07	70.93	9.23	16.37
Prueba 5 17 cm	191203.15	667	129.057	9.7	20.4

En las figuras 1.13, 1.14, 1.15 y 1.16 se muestra el campo de temperatura a lo largo del ducto, para alturas de ducto de 32, 27, 22 y 17cm (para altura de 37 cm ver figura 1.9). En este caso se verifica un comportamiento similar al de la prueba 1, la diferencia es el valor de la tasa de transferencia de calor que según lo mostrado en la tabla 1.5 aumenta con la disminución de la altura del ducto. Al reducirse la altura del ducto disminuye el área transversal, por lo tanto, a igualdad de flujo másico, la velocidad aumenta, lo cual incrementa la tasa de transferencia de calor y la caída de presión. Por consiguiente disminuye la temperatura de salida de los gases.

Figura 1.13. Campo de temperatura altura 32 cm (modelo k-e Standard)

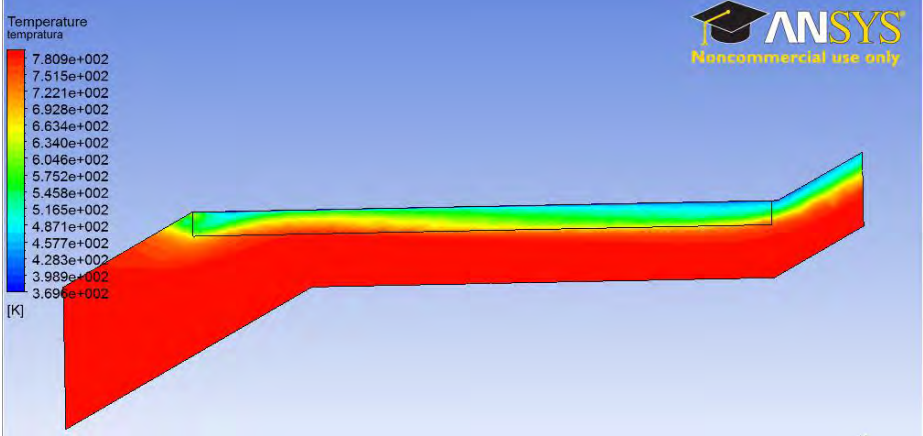


Figura 1.14. Campo de temperatura altura 27 cm (modelo k-e Standard)

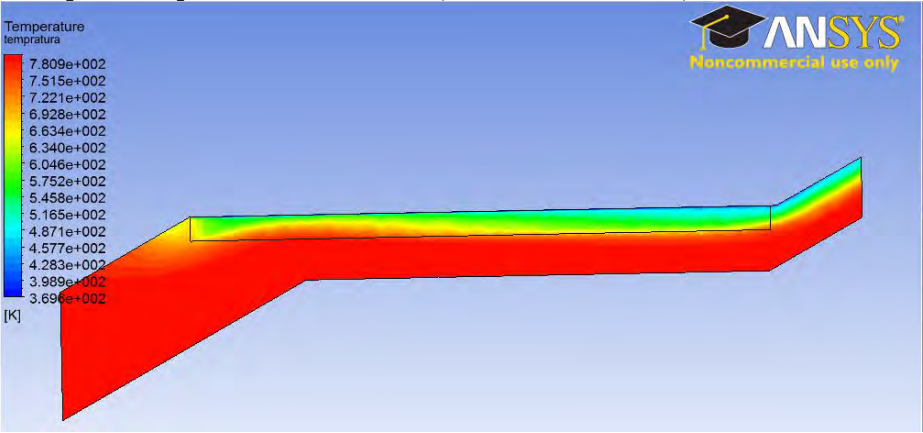


Figura 1.15. Campo de temperatura altura 22 cm (modelo k-e Standard)

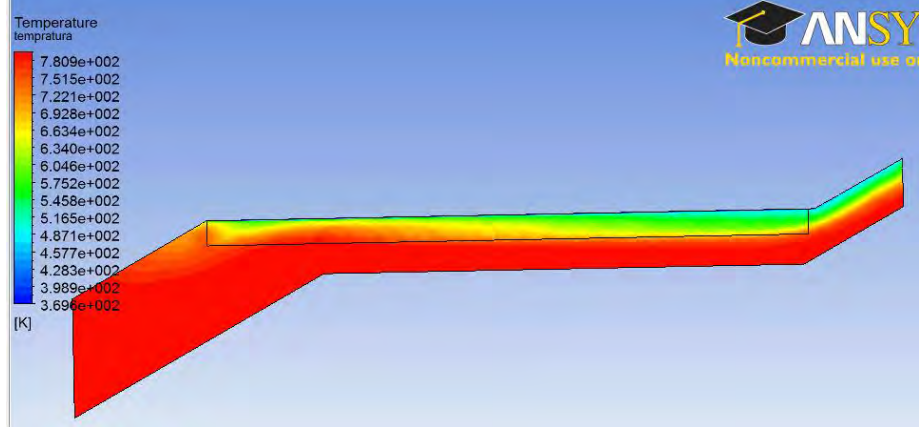
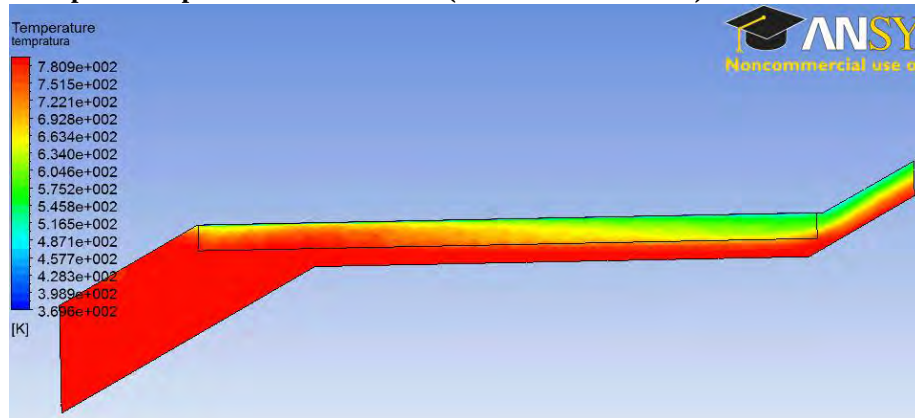


Figura 1.16. Campo de temperatura altura 17 cm (modelo k-e Standard)



En las figuras 1.17, 1.18, 1.19 y 1.20, se muestra el campo de presión a lo largo del ducto, para alturas de ducto de 32, 27, 22 y 17cm (para altura de 37 cm ver figura 1.10). Lo interesante de estas gráficas es que se aprecia como al disminuir la altura del fondo de la paila respecto al piso del ducto de humos, aumenta la caída de presión en el ducto de humos, como consecuencia del aumento de la velocidad de los gases de combustión.

Figura 1.17. Campo de presión altura 32 cm (modelo k-e Standard)

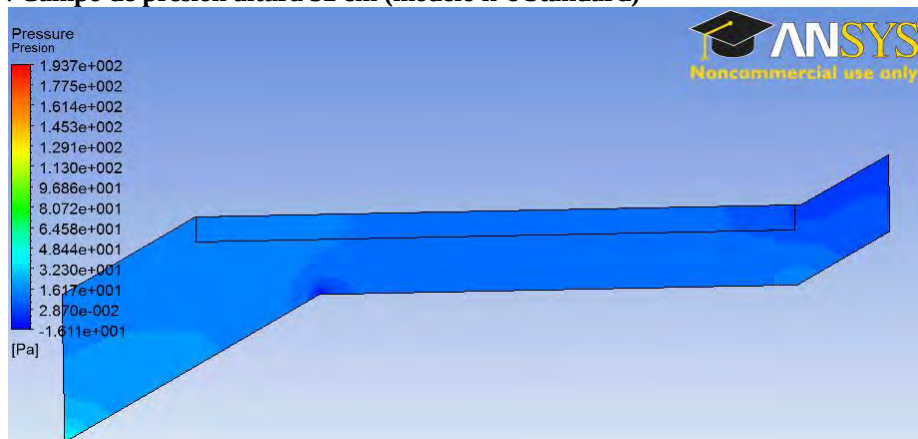


Figura 1.18. Campo de presión altura 27 cm (modelo k-e Standard)

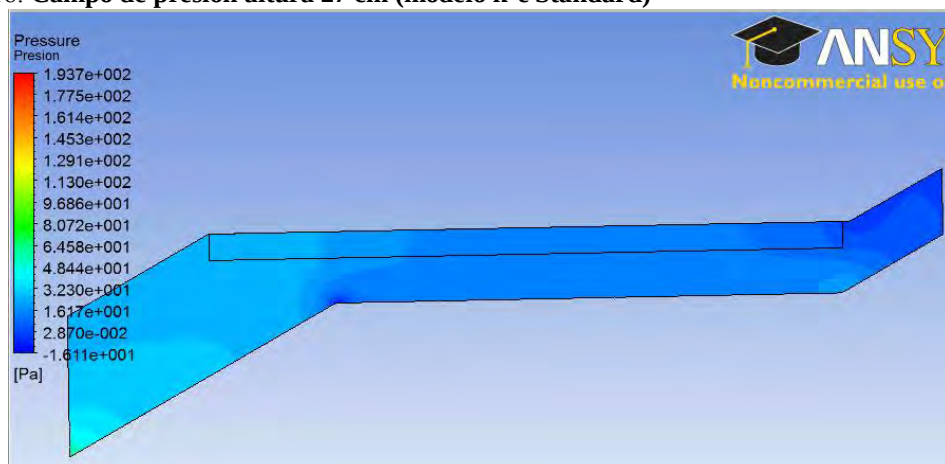


Figura 1.19. Campo de presión altura 22 cm (modelo k-e Standard)

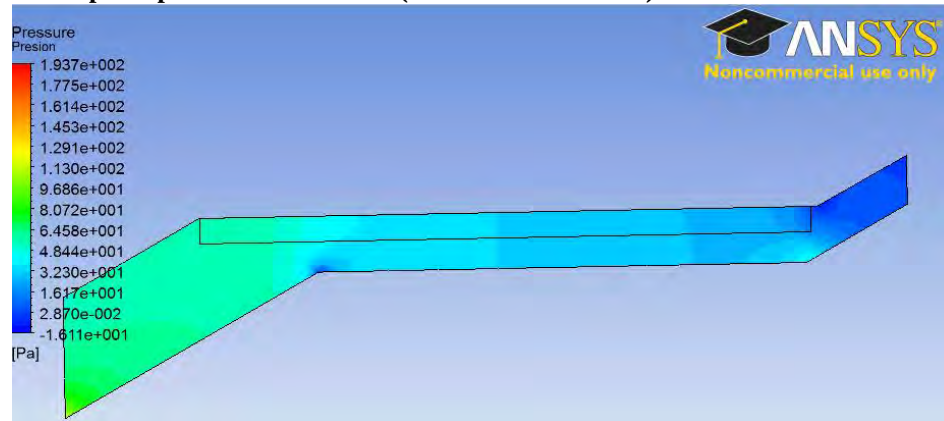
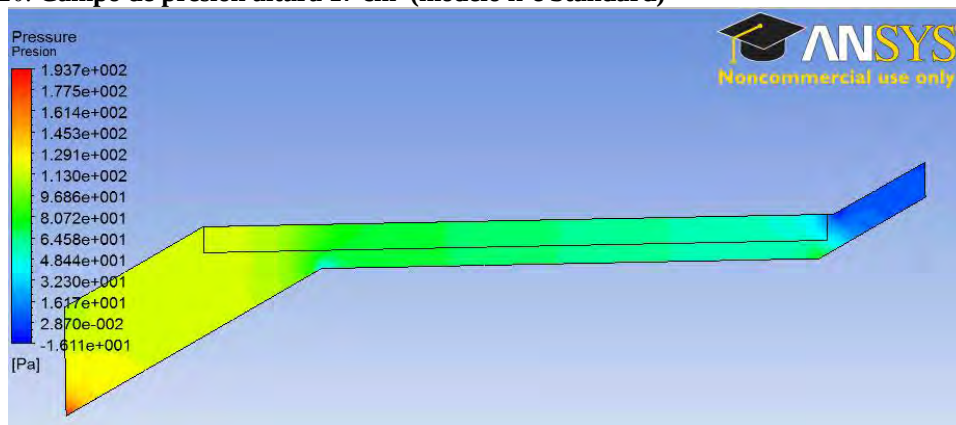


Figura 1.20. Campo de presión altura 17 cm (modelo k-e Standard)



En las figuras 1.21, 1.22, 1.23 y 1.24, se muestra el campo de velocidad a lo largo del ducto, para alturas de ducto de 32, 27, 22 y 17cm (para altura de 37 ver figura 1.11). Al observarse estas gráficas se llega a la conclusión que al disminuir la altura del ducto, aumenta la velocidad. Por la ecuación de conservación de la masa, la velocidad es inversamente proporcional a la sección del ducto, y debido a que disminuye la altura entonces también disminuye la sección, lo que a su vez tiene el efecto de global de aumentar la velocidad.

Figura 1.21. Campo de velocidad altura 32 cm (modelo k-e Standard)

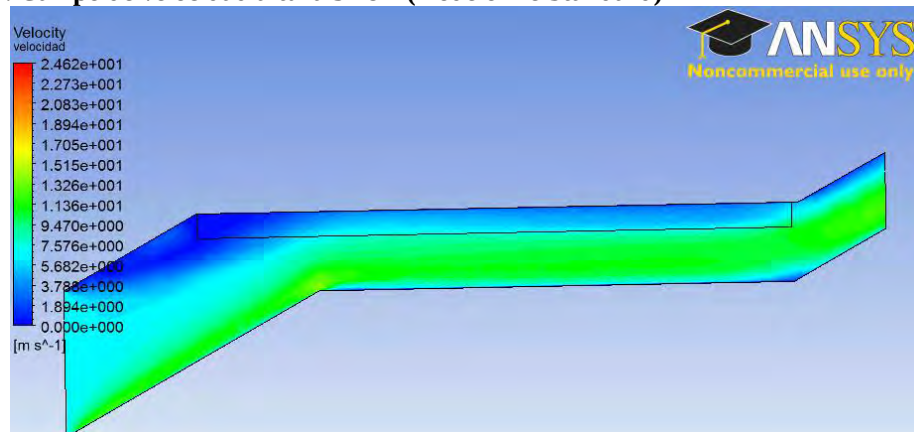


Figura 1.22. Campo de velocidad altura 27 cm (modelo k-e Standard)

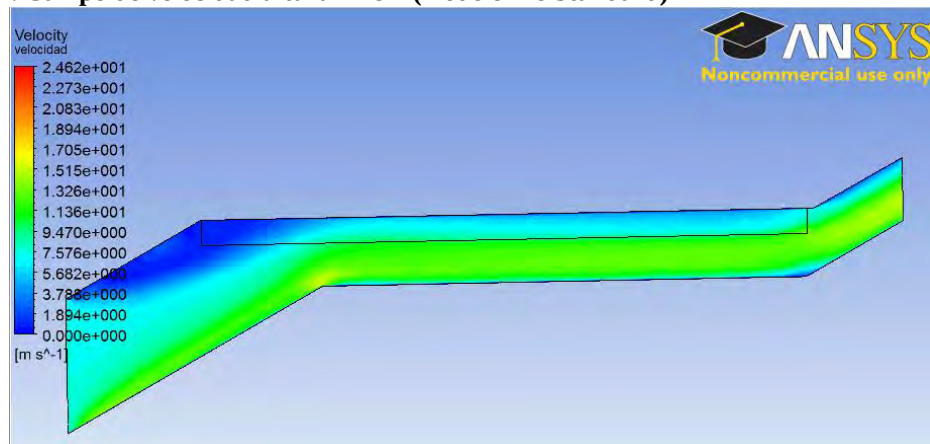


Figura 1.23. Campo de velocidad altura 22 cm (modelo k-e Standard)

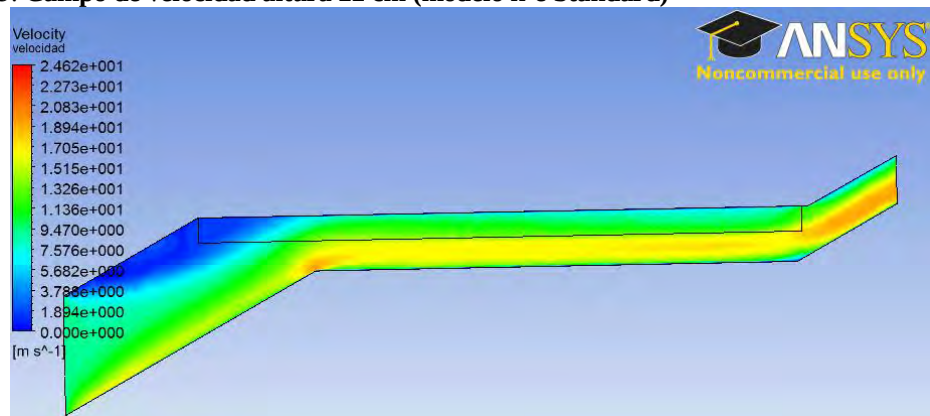
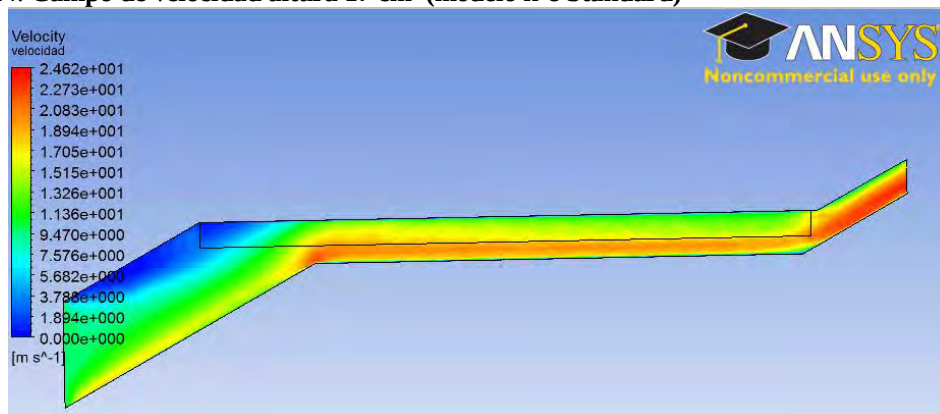


Figura 1.24. Campo de velocidad altura 17 cm (modelo k-e Standard)



En las figuras 1.25, 1.26, 1.27 y 1.28, se muestra la distribución de los valores de densidad a lo largo del ducto, para alturas de ducto de 32, 27, 22 y 17cm (para altura de 37 ver figura 1.12). Se verifica que al disminuir la altura del fondo de la paila con respecto al piso del ducto de humos, aumenta la tasa de transferencia de calor, lo que a su vez hace que disminuya la temperatura y aumente la densidad.

Figura 1.25. Distribución de los valores de densidad altura 32 cm (modelo k-e Standard)

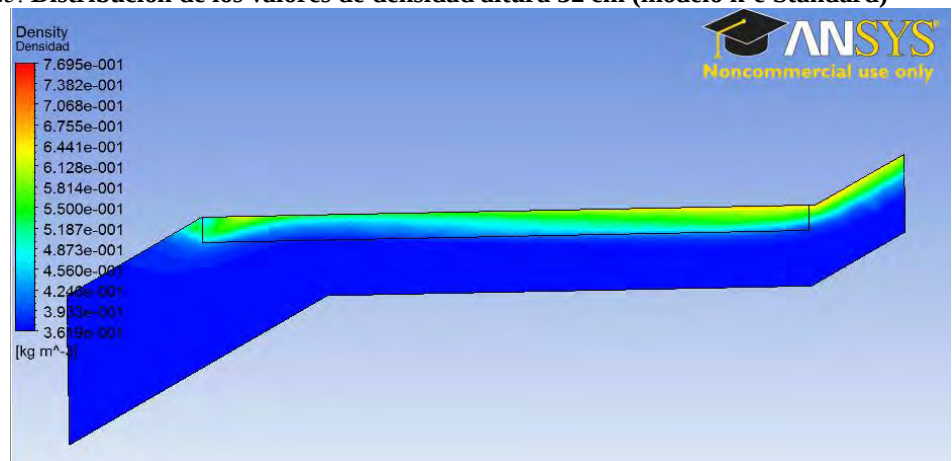


Figura 1.26. Distribución de los valores de densidad altura 27 cm (modelo k-e Standard)

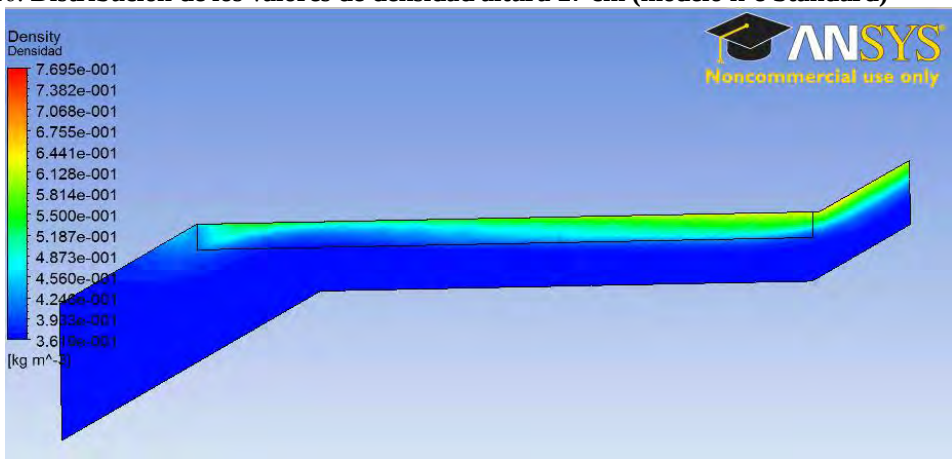


Figura 1.27. Distribución de los valores de densidad altura 22 cm (modelo k-e Standard)

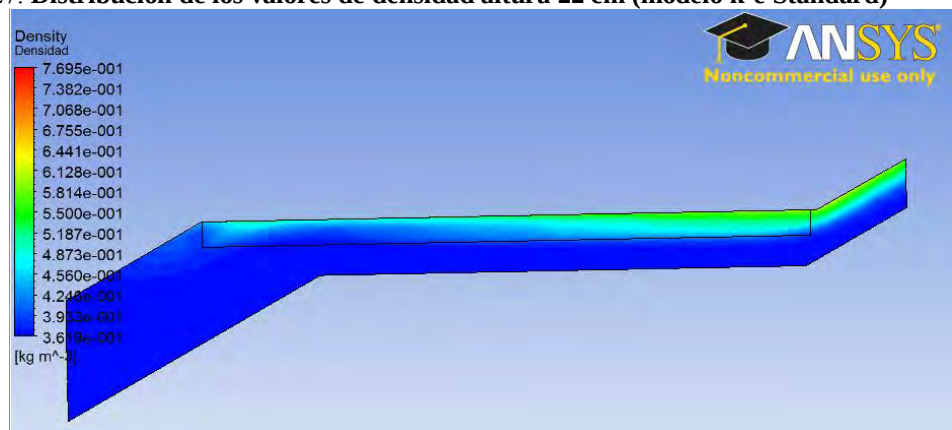
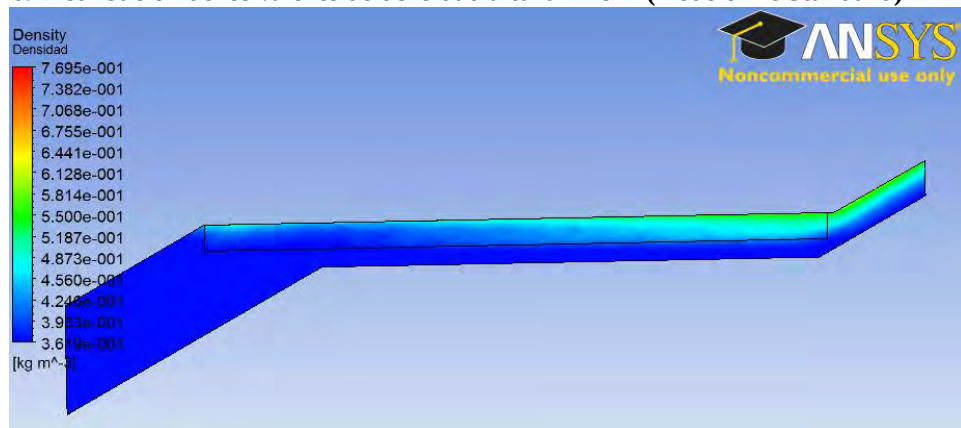


Figura 1.28. Distribución de los valores de densidad altura 17 cm (modelo k-e Standard)



Conclusiones

Se ha determinado por medio de la simulación numérica, la tasa de transferencia de calor en una paila aleteada existente, la cual es la primera paila evaporada de la hornilla panelera ubicada en la localidad de Santa Rosa de Chonta, distrito de Montero, provincia de Ayabaca departamento de Piura.

Se comprobó que las diferencias entre el valor de la tasa de transferencia de calor de la paila aleteada obtenido por simulación y los valores de diseño y experimental, son modestas. Por consiguiente, se puede utilizar este procedimiento de manera confiable para comprobar y complementar la fase de diseño y dimensionamiento del ducto de humos y las pailas.

Se verificó que las diferencias, entre el valor simulado y aquellos de diseño y experimental de la temperatura de salida de la paila, son muy pequeñas. Por consiguiente, Los modelos matemáticos y condiciones de frontera utilizados durante la simulación son los adecuados al igual que las hipótesis empleadas para determinar el valor de diseño.

Se analizó la influencia de la altura del ducto de humos en la tasa de transferencia de calor. Cuando se reduce la altura del ducto, la velocidad de los gases aumenta. Por lo tanto, aumenta la potencia térmica transferida y las pérdidas de presión, mientras que la temperatura de los gases de combustión a la salida de la paila disminuye.

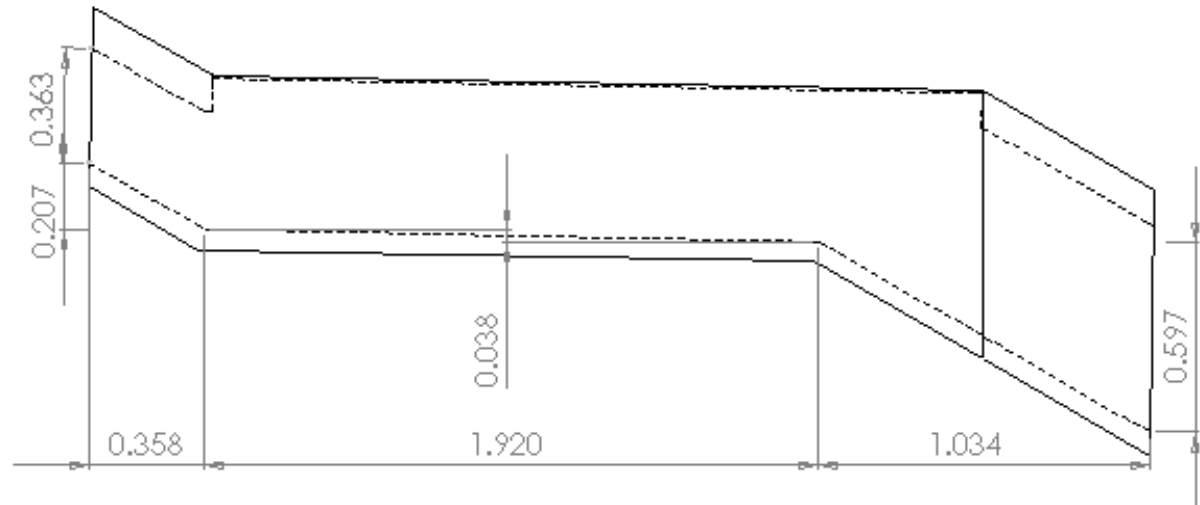
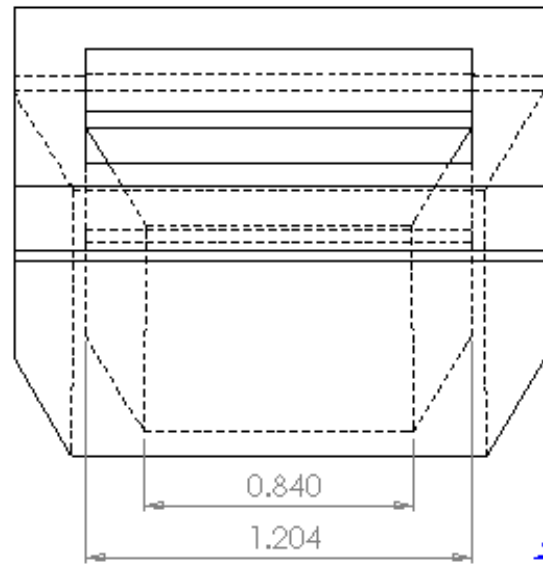
Es importante observar que la selección adecuada de modelos matemáticos y condiciones de frontera para la simulación tendrá un fuerte impacto en la precisión y confiabilidad de los resultados.

Como se ha podido apreciar, la mecánica de fluidos computacional se presenta como una alternativa para el estudio del flujo de fluidos tridimensionales y con geometrías complejas, debido a la reducción de costos y tiempo en comparación con el método experimental que sería la otra opción.

Bibliografía

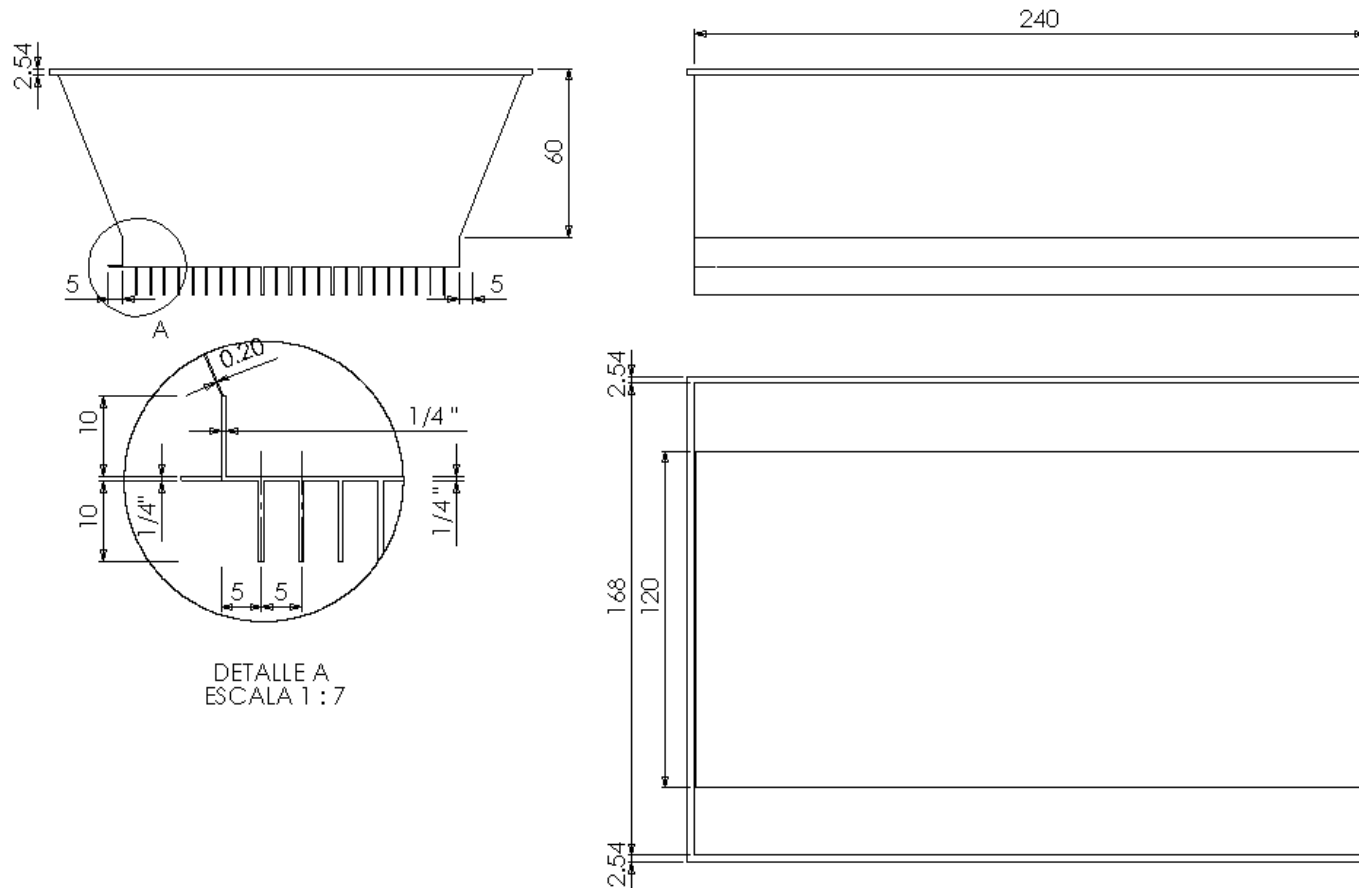
- [1] Van der Vyver, Dirker, Meyer. ***Validation of a CFD model of a three-dimensional Tube-in-tube heat exchanger***. Third International conference on CFD in the Minerals and process Industries CSIRO, Melbourne, Australia. 2003.
- [2] J.S. Jayakumar, S.M. Mahajani, J.C. Mandal, P.K. Vijayan, Rohidas Bhoi. ***Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers***.
- [3] Flavio C.C. Galeazzo, Raquel Y. Miura, Jorge A.W. Gut, Carmen C. Tadini. ***Experimental and numerical heat transfer in a plate heat exchanger***. Chemical Engineering Science 61 (2006) 7133 – 7138.
- [4] Gordillo, Gerardo. Jaramillo, Rita C. ***Simulación del movimiento del jugo en un intercambiador pirotubular para la industria panelera***.
- [5] Hugo R. García B, Luis C. Albarracín, Adriana Toscano Latorre, Natalia J. Santana, I.A. Orlando Insuasty. ***Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera***. Ministerio de Agricultura y desarrollo rural – Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). 2007.
- [6] Barbosa, S. ***Manual para la selección, montaje y operación de los equipos de molienda para la producción de panela***. 1991.
- [7] Ansys Fluent 12.0. ***Theory Guide***. 2009.
- [8] B. E. Launder and D. B. Spalding. ***Lectures in Mathematical Models of Turbulence***. Academic Press, London, England, 1972.
- [9] Ansys Workshops. ***Introduction to Fluent***. 2009
- [10] Ansys Workbench 12.0. ***Meshing Help***. 2009
- [11] Ansys Workshops. ***Meshing***. 2009
- [12] Yépez Oblitas, Mario Alejandro. ***Simulación de la transferencia de calor en una paila pirotubular para la industria panelera***. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Universidad de Piura - 2011.
- [13] Solberg, David. ***Online heat transfer measurement and analysis for sugar mill evaporators***. Tesis para obtener el grado de Máster en Ingeniería Química. Universidad de Louisiana. 2002.
- [14] Yunus A. Çengel; Michael A. Boles. ***Termodinámica***. Sexta edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, México D.F, Cop. 2009.

Anexo 1: Plano del ducto de humos



Unidades en metros

Anexo 2: Plano de la paila



Unidades en centímetros

Anexo 3: Resumen de modelos, materiales y condiciones de frontera

Datos sobre las pruebas

#	Prueba	Comentario
1	Prueba1	Altura del ducto con respecto a su base: 37 cm
2	Prueba2	Altura del ducto con respecto a su base: 32 cm
3	Prueba3	Altura del ducto con respecto a su base: 27 cm
4	Prueba4	Altura del ducto con respecto a su base: 22 cm
5	Prueba5	Altura del ducto con respecto a su base: 17 cm

Información General

- Simulación realizada en estado estacionario.

Modelos utilizados

- Energía.
- Viscosidad: k-épsilon Standard.
- Transporte de especies (Species Transport)

Materiales

#	Prueba	Elementos	Densidad kg/m ³	Cp [kJ/kg.K]	Conductividad térmica [W/m.K]	Viscosidad [Pa.s]	Peso Molecular kg/kmol	Longitud caract.	Parámetro de Energía L-J	Mass Diffusi. m ² /s
1	Prueba1	CO2	X	Pie-pol	Kinetic theory	Sutherland	Constant	Constant	Constant	X
		CO	X	Pie-pol	Kinetic theory	Sutherland	Constant	Constant	Constant	X
		N2	X	Pie-pol	Polinomial	Sutherland	Constant	Constant	Constant	X
		O2	X	Pie-pol	Polinomial	Sutherland	Constant	Constant	Constant	X
		H2O,vapor	X	Pie-pol	Polinomial	Sutherland	Constant	Constant	Constant	X
		MIXTURE	Incompress. -ideal-gas	Mixing law	Ideal gas Mixing law	Ideal gas Mixing law	X	X	X	Kinetic theory
2	Prueba2	Igual al anterior								
3	Prueba3	Igual al anterior								
4	Prueba4	Igual al anterior								
5	Prueba5	Igual al anterior								

* Se han puesto los nombres en inglés ya que éstos son los que aparecen en el programa. Además el término *constant* hace referencia a valores por defecto que brinda el programa Ansys-Fluent

Condiciones de operación

#	Prueba	Presión de Operación [Pa]	Gravedad [m/s ²]
1	Prueba1	87717.90	-9.81
2	Prueba2	"	"
3	Prueba3	"	"
4	Prueba4	"	"
5	Prueba5	"	"

Condición de frontera: Inlet

#	Prueba	Flujo másico kg/s	Int. Turb. %	Diámetro Hidráulico m	Temperatura K	Fracciones molares				
						CO	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O vapor
1	Prueba1	0.6114	3.38	0.73	795.3339	4.2787e-02	X	0.6251	8.3737e-2	0.1935
2	Prueba2	"	3.36	0.69	"	"	"	"	"	"
3	Prueba3	"	3.35	0.65	"	"	"	"	"	"
4	Prueba4	"	3.33	0.6	"	"	"	"	"	"
5	Prueba5	"	3.31	0.56	"	"	"	"	"	"

Condición de frontera: Outlet

#	Prueba	Presión manométrica [Pa]	Int. Turb. %	Diámetro Hidráulico m	Temperatura K	Fracciones molares				
						CO	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O vapor
1	Prueba1	0	3.38	0.56	300	4.2787e-02	X	0.6251	8.3737e-2	0.1935
2	Prueba 2	"	3.36	0.49	"	"	"	"	"	"
3	Prueba 3	"	3.35	0.41	"	"	"	"	"	"
4	Prueba 4	"	3.33	0.33	"	X	5.4885e-2	"	"	"
5	Prueba 5	"	3.31	0.24	"	"	"	"	"	"

Condición de Frontera: Temperatura del jugo

#	Prueba	Temperatura K
1	Prueba1	369.5534
2	Prueba2	"
3	Prueba3	"
4	Prueba4	"
5	Prueba5	"

Condición de Frontera: Paredes y suelo

#	Prueba	Flujo de calor W/m2
1	Prueba1	0 (adiabático)
2	Prueba 2	"
3	Prueba 3	"
4	Prueba 4	"
5	Prueba 5	"

Condición de Frontera: Simetría

#	Prueba	Simetría
1	Prueba1	Activado
2	Prueba2	"
3	Prueba3	"
4	Prueba4	"
5	Prueba5	"

Anexo 4: Cálculo de la potencia térmica

Largo de la paila	2.4 m
Ancho de la paila	1.2 m
Ancho superior de la paila	1.68 m
Altura de la falca	0.6 m
Densidad del jugo crudo	1071.24 kg/m ³
Temperatura de ebullición	96.4 °C
Calor latente de vaporización	2266.48 kJ/kg

Cálculo volumen inicial		
Altura 1	0.07	m
Altura 2	0.097	m
Volumen prisma trapezoidal	0.24048	m ³
Volumen troncos de pirámide	0	m ³
Volumen	0.240	m ³

Cálculo volumen inicial		
Altura 1	0.25	m
Altura 2	0.266	m
Volumen prisma trapezoidal	0.00450	m ³
Volumen troncos de pirámide	0.00551	m ³
Volumen	0.74304	m ³

Cálculo volumen inicial		
Altura 1	0.14	m
Altura 2	0.165	m
Volumen prisma trapezoidal	0.00032	m ³
Volumen troncos de pirámide	0.00085	m ³
Volumen	0.4392	m ³

Cálculo volumen inicial		
Altura 1	0.14	m
Altura 2	0.165	m
Volumen prisma trapezoidal	0.00032	m ³
Volumen troncos de pirámide	0.00085	m ³
Volumen	0.4392	m ³

Cálculo volumen final	
Altura 1	0.055 m
Altura 2	0.079 m
Volumen prisma trapezoidal	0.19296 m ³
Volumen troncos de pirámide	0 m ³
Volumen	0.193 m ³

Diferencia de alturas	
Diferencia altura inicial	1.5 cm
Diferencia de altura final	1.8 cm

Volumen agua evaporada	
Volumen inicial -	
Volumen final	0.048 m ³

Tiempo	
Hora de medición	30-9-11
volumen inicial	10:53 AM
Hora de medición	30-9-11
volumen final	11:14 AM
	hh:
Tiempo en hh:mm	0:21 mm
Tiempo en hh	0.35 h
	1260 seg

Cálculo volumen final	
Altura 1	0.215 m
Altura 2	0.23 m
Volumen prisma trapezoidal	0.6408 m ³
Volumen troncos de pirámide	0.007212 m ³
Volumen	0.648 m ³

Diferencia de alturas	
Diferencia altura inicial	3.5 cm
Diferencia de altura final	3.6 cm

Volumen agua evaporada	
Volumen inicial -	
Volumen final	0.107 m ³

Tiempo	
Hora de medición	30-9-11
volumen inicial	11:25 AM
Hora de medición	30-9-11
volumen final	12:13 PM
	hh:
Tiempo en hh:mm	0:48 mm
Tiempo en hh	0.80 h
	2880 seg

Cálculo volumen final	
Altura 1	0.125 m
Altura 2	0.146 m
Volumen prisma trapezoidal	0.39024 m ³
Volumen troncos de pirámide	0.000622 m ³
Volumen	0.391 m ³

Diferencia de alturas	
Diferencia altura inicial	1.5 cm
Diferencia de altura final	1.9 cm

Volumen agua evaporada	
Volumen inicial -	
Volumen final	0.050 m ³

Tiempo	
Hora de medición	30-9-11
volumen inicial	12:16 PM
Hora de medición	30-9-11
volumen final	12:39 PM
	hh:
Tiempo en hh:mm	0:23 mm
Tiempo en hh	0.38 h
	1380 seg

Cálculo volumen final	
Altura 1	0.09 m
Altura 2	0.11 m
Volumen prisma trapezoidal	0.288 m ³
Volumen troncos de pirámide	0 m ³
Volumen	0.288 m ³

Diferencia de alturas	
Diferencia altura inicial	2 cm
Diferencia de altura final	2 cm

Volumen agua evaporada	
Volumen inicial -	
Volumen final	0.058 m ³

Tiempo	
Hora de medición	30-9-11
volumen inicial	1:16 PM
Hora de medición	30-9-11
volumen final	1:40 PM
	hh:
Tiempo en hh:mm	0:24 mm
Tiempo en hh	0.40 h
	1440 seg

Flujo másico			Flujo másico			Flujo másico			Flujo másico		
Masa de agua	50.9053248	kg	Masa de agua	114.6451332	kg	Masa de agua	53.22503075	kg	Masa de agua	61.92624192	kg
Flujo másico	0.040401051	kg/s	Flujo másico	0.039807338	kg/s	Flujo másico	0.038568863	kg/s	Flujo másico	0.043004335	kg/s
Potencia térmica	91613.83	W		90267.52	W		87459.14	kW		97517.06	W
Potencia térmica	91.61383	kW		90.26752	kW		87.45914	kW		97.51706	kW
Potencia térmica promedio	91714.39	W									
Potencia térmica promedio	91.71	kW									