

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

" Diseño de un banco de pruebas para evaluar propagación de la llama
bajo condiciones de flujo controlada"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Alvaro Francisco Acosta Calderon

Stephanie Mishell Mite Villagómez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias y amigos quienes nos han dado su apoyo incondicional en todos estos años. Damos las gracias a Freddy Jervis y Emérita Delgado por su paciencia y apoyo en este proyecto

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Alvaro Francisco Acosta Calderon

Stephanie Mishell Mite Villagomez

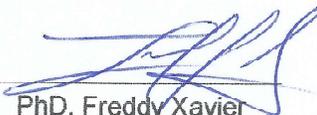
PhD. Freddy Xavier Jervis Calle

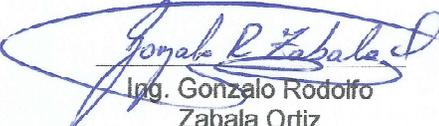
Ing. Gonzalo Rodolfo Zabala Ortiz

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.


Alvaro Francisco Acosta
Calderon


Stephanie Mishell Mite
Villagomez


PhD. Freddy Xavier
Jervis Calle


Ing. Gonzalo Rodolfo
Zabala Ortiz

RESUMEN

El presente proyecto es elaborado con la finalidad de evaluar el comportamiento que presentan diferentes materiales de construcción, cuando una llama se propaga durante la combustión. Para cumplir con este objetivo se diseña un banco de pruebas que permita analizar estos materiales bajo condiciones de un ambiente controlado.

La metodología a seguir fue seleccionar los distintos componentes que integran al banco de pruebas, mediante pruebas experimentales y análisis por simulación con un programa computador. Los componentes principales que integran el banco de pruebas son: ventilador axial, dispositivo reductor de turbulencia (honeycomb), mallas protectoras, regulador de voltaje y porta-muestra. Los materiales de prueba que forman parte de este proyecto incluyeron: PMMA (Polimetilmetacrilato); maderas y derivados; polipropileno y poliuretano (elastómero), para ser evaluados mediante una simulación y verificar que cumplen con las limitaciones de nuestro banco de pruebas, tales como la temperatura máxima de trabajo dentro de la cámara de prueba y la tasa de calor liberada. La toma de datos y mediciones de la inflamabilidad del material mediante un aparato de propagación de incendios están bajo la norma ASTM 2058.

Como resultado se obtiene la temperatura máxima de la superficie del vidrio de 275 °C y la velocidad del flujo de aire de 0.26 m/s. El dimensionamiento del equipo fue realizado para desarrollar ensayos en muestras de ancho 12 cm, largo 30 cm y espesor 10 - 25 mm. Finalizado el diseño del banco de prueba se determinó que el espacio de trabajo requerido es de 0.87 x 1.08 m y una altura de 1.24 m.

Palabras Claves: Banco de pruebas, ambiente controlado, capa límite.

ABSTRACT

The present project was developed with the purpose of allowing the evaluation of the behavior of construction materials, when a flame is propagated during combustion. To fulfill this objective, a test bench was designed to verify these materials under the conditions of a controlled environment.

The methodology to be followed was to select the different components that integrate the test bench, through experimental tests and analysis by simulation with a computer program. The main components that make up the test bench are: axial fan, turbulence reducing device (honeycomb), protective meshes, voltage regulator and the sample holder. And the test materials that were part of this project included: PMMA (Polymethylmethacrylate); woods and derivatives; polypropylene and polyurethane (elastomer), to be evaluated through a simulation and verify that they meet the limitations of our test bench, such as the maximum working temperature inside the test chamber and the rate of heat released. The taking of data and measurements of the flammability of the material by means of a fire propagation device are under the ASTM 2058 standard.

As a result, the maximum glass surface temperature is 275 °C, and the air flow velocity is obtained as 0.26 m/s. The sizing of the equipment was carried out to allow testing on samples 12 cm wide, 30 cm long and 10 - 25 mm thick. Once the design of the test bench was completed, it was determined that the required workspace is 0.87 x 1.08 m and a height of 1.24 m.

Keywords: Test bench, Controlled environment, boundary layer

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo General.....	1
1.2.2 Objetivos específicos	1
1.3 Marco teórico.....	2
1.3.1 Ignición del fuego.....	2
1.3.2 Tipos de llama.....	3
1.3.3 Propagación de una llama	3
1.3.4 Número de transferencia de masa “B- Number”	5
1.3.5 Tasa de liberación de calor	5
1.3.6 Prueba de propagación de llama ascendente.....	6
1.3.7 Teoría de capa límite	7
1.3.8 Dispositivos de reducción de turbulencia (Honeycomb)	8
CAPÍTULO 2.....	10
2 METODOLOGÍA DEL DISEÑO.....	10
2.1 Bases y consideraciones de diseño	10

2.2	Estrategia de diseño.....	11
2.3	Alternativas de diseño	13
2.3.1	Fuente de ignición.....	13
2.3.2	Cámara de prueba.....	19
2.3.3	Dispositivo para reducción de turbulencia	21
2.4	Diseño detallado.....	23
CAPÍTULO 3.....		29
3	RESULTADOS.....	29
3.1	Ensamble banco de pruebas.....	29
3.2	Simulación flujo controlado dentro de la cámara de pruebas	36
3.3	Análisis de riesgo con los materiales de prueba	39
3.4	Mediciones del perfil de llama	42
3.5	Análisis de los niveles de oxígeno.....	43
3.6	Análisis de costos.....	45
CAPÍTULO 4.....		47
4	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	47
4.1	Conclusiones.....	47
4.2	Recomendaciones.....	48
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Instituto de Normalización Alemán
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
MDF	Medium Density Fibreboard
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PMMA	Polimetilmetacrilato
SFPE	Handbook of Fire Protection Engineering
THW	Thermoplastic, Heat and Water Resistant

SIMBOLOGÍA

\dot{m}_f	Pérdida de masa de la muestra
\dot{E}	Calor liberado
h_f	Coefficiente de pérdidas de presión
A_s	Área superficial de la muestra
C_p	Calor específico del aire a temperatura media
D_h	Diámetro hidráulico de una celda del direccionador de flujo
E_{libre}	Espacio libre de trabajo
K_{hon}	Coefficiente de fricción del honeycomb
K_{malla1}	Coefficiente de fricción de la malla protectora del ventilador
K_{malla2}	Coefficiente de fricción de la malla protectora del honeycomb
L_h	Espesor del direccionador de flujo
L_e	Longitud de entrada
$L_{muestra}$	Longitud de la muestra
L_{vidrio}	Longitud total de la cámara de vidrio
N_{uD}	Número de Nusselt
P_{atm}	Presión atmosférica
P_o	Presión de entrada
P_r	Número de Prandtl
Re_d	Número de Reynolds basado en el diámetro interno de los agujeros de la malla
T_∞	Temperatura entrada flujo de aire
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{emp}	Temperatura interna de la cámara

T_f	Temperatura filmica
T_m	Temperatura media
T_{mi}	Temperatura del aire a la entrada del ducto
T_{mo}	Temperatura del aire a la salida del ducto
T_s	Temperatura superficial
U_{max}	Velocidad máxima del flujo de aire entrante
V_{media}	Velocidad media flujo de aire entrante
d_{cil}	Diámetro del cilindro de la cámara de prueba
d_d	Diámetro espaciado del mallado
k_{air}	Coeficiente conductividad térmica
\dot{m}	Flujo másico del aire
q_{conv}	Flujo de calor liberado por convección
β_{hon}	Porosidad del honeycomb
β_{malla}	Porosidad de malla protectora
δ_H	Espesor de capa limite hidrodinámico
δ_L	Espesor de capa limite térmico por de la muestra
λ_{hon}	Coeficiente dependiente del número de Reynolds
μ_{air}	Viscosidad dinámica, evaluada a temperatura media
μ_d	Viscosidad dinámica
μ_s	Viscosidad dinámica, evaluada a temperatura superficial
ν_{air}	Viscosidad cinemática del aire
ρ_{air}	Densidad del aire
ϵ_{plast}	Rugosidad del material del honeycomb
°C	Grados celcius

A	Área de la cámara
d	Diámetro cámara de prueba
g	Aceleración de gravedad
kg	Kilogramo
kJ	Kilojoule
kPa	Kilopascal
m	metro
Q	Flujo volumétrico de entrada
Re	Número de Reynolds
s	segundo
V	Voltios
ΔH	Es el calor de combustión o poder calorífico
L	Longitud total
Re_D	Reynolds crítico para flujo laminar
Re_L	Numero de Reynolds para la superficie de la muestra

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Propagación de llama en un fósforo	3
Figura 1.2 Distancia de separación y capa límite de una llama.....	4
Figura 1.3 Calorímetro y sus partes	6
Figura 1.4 Crecimiento de la capa límite de una placa plana	8
Figura 1.5 Coeficientes de pérdida de presión para diferentes geometrías del acondicionador.	9
Figura 2.1 Esquema de bases y consideraciones de diseño.....	11
Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de diseño	12
Figura 2.3 Ignición de madera de Aglomerado MDF con fuente regulada de voltaje	15
Figura 2.4 Ignición de madera de Aglomerado X con fuente regulada de voltaje	15
Figura 2.5 Ignición de madera de Aglomerado MDF con mechero de Bunsen	16
Figura 2.6 Ignición de madera de Aglomerado X con mechero de Bunsen.....	17
Figura 2.7 Ignición de madera de Aglomerado MDF con mecha de Alcohol al 70% de Etanol	18
Figura 2.8 Ignición de madera de Aglomerado X con mecha de Alcohol al 70% de Etanol	18
Figura 2.9 Distribución de capa límite térmica e hidrodinámica.....	24
Figura 2.10 Sistema de inyección oxígeno / nitrógeno.	28
Figura 3.1 Componentes del banco de pruebas.....	29
Figura 3.2 Simulación de carga estática mesa del banco de pruebas.....	31
Figura 3.3 Componentes del Porta-muestra.....	33
Figura 3.4 Simulación de deformación a causa de esfuerzos térmicos.....	35
Figura 3.5 Simulación flujo de aire turbulento.....	36
Figura 3.6 Simulación flujo de aire con el honeycomb y dos mallas protectoras.....	37
Figura 3.7 A la izquierda se muestra el perfil de la llama, y a la derecha se muestran los filtros aplicados para medir la distancia de separación en el perfil de la llama	42
Figura 3.8 Distancia de separación en función de la propagación y el tiempo para el material aglomerado.....	43
Figura 3.9 Relación de porcentaje de oxígeno en el flujo de aire, al introducir oxígeno	44
Figura 3.10 Relación de porcentaje de oxígeno en el flujo de aire, al introducir nitrógeno.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Poder Calorífico de las muestras.....	13
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas de Regulador de Voltaje.....	14
Tabla 2.3 Matriz de ponderación para alternativas de tipo de ignición	19
Tabla 2.4 Matriz de decisión para el tipo de fuente de ignición	19
Tabla 2.5 Cuadro de comparación de ventajas y desventajas entre las alternativas propuestas.....	20
Tabla 2.6 Matriz de ponderación para alternativas de material de la cámara de prueba	20
Tabla 2.7 Matriz de decisión para el material de la cámara de prueba	21
Tabla 2.8. Principales características del honeycomb.....	21
Tabla 2.9 Alternativas de dispositivos para reducción de turbulencia	22
Tabla 2.10 Matriz de ponderación para alternativas de dispositivo de reducción de turbulencia.....	22
Tabla 2.11 Matriz de decisión para el dispositivo de reducción de turbulencia	23
Tabla 2.12 Matriz de decisión para el dispositivo de reducción de turbulencia	26
Tabla 3.1 Reducción porcentual de velocidad tras el paso por cada dispositivo utilizado	38
Tabla 3.2 Líneas de Corriente en flujo de aire con y sin calentamiento	39
Tabla 3.3 Resultados de las pruebas de simulación	40
Tabla 3.4 Tasa de liberación de calor para cada material propuesto	41
Tabla 3.5 Temperatura del aire a la salida del ducto.....	41
Tabla 3.6 Temperatura en la superficie del vidrio.....	41
Tabla 3.7 Porcentaje de consumo de oxígeno tras cada prueba realizada	44
Tabla 3.8 Porcentaje de consumo de nitrógeno tras cada prueba realizada	45
Tabla 3.9 Detalle de los costos para construcción de banco de pruebas.....	45

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Ensamble del banco de pruebas
- PLANO 2 Ensamble del porta-muestra
- PLANO 3 Cámara de vidrio
- PLANO 4 Varilla del porta-muestra
- PLANO 5 Soporte del porta-muestra
- PLANO 6 Ducto que sostiene a la cámara de vidrio
- PLANO 7 Ducto que sostiene la malla protectora del honeycomb
- PLANO 8 Ducto que sostiene al honeycomb
- PLANO 9 Ducto que sostiene la malla protectora del ventilador
- PLANO 10 Estructura extremidades de la mesa
- PLANO 11 Placa de la mesa
- PLANO 12 Protector de la mesa
- PLANO 13 Honeycomb
- PLANO 14 Malla
- PLANO 15 Probeta

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Existe una necesidad por evaluar cómo se comportan diferentes materiales cuando se propaga una llama durante la combustión. Para predecir el riesgo que un fuego bajo condiciones determinadas representa, es necesario medir diferentes parámetros como son la velocidad del frente de combustión, concentración de oxígeno, calor disipado, temperatura y producción de gases durante la combustión de diferentes materiales.

Las normas de construcción hoy en día requieren regulaciones más estrictas para materiales en distintas aplicaciones y sólo pueden ser evaluadas utilizando bancos de prueba apropiados. En este proyecto, se analiza el diseño de un banco de prueba que refleje las condiciones en las que se pueda evaluar qué tan propenso es un material a quemarse. El propósito será evaluar la resistencia que proyecta un material al quemarse bajo diferentes condiciones de flujo controlado y la propagación de la llama durante la combustión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un banco de prueba para que evalúe la propagación del frente de llama bajo condiciones de flujo controlado mediante pruebas experimentales y un sistema de instrumentación.

1.2.2 Objetivos específicos

Diseñar un sistema que proporcione un flujo constante de aire/ oxígeno durante la propagación de la combustión para diversos materiales en un ambiente controlado.

Realizar una prueba experimental de propagación de frente de llama para diversos materiales en un ambiente controlado.

Diseñar un sistema de instrumentación que refleje diversas condiciones de propagación de calor vs tiempo; incluyendo medidas gráficas de la llama y pérdida de masa durante la combustión.

Determinar el flujo requerido de oxígeno / nitrógeno para mantener un ambiente controlado a diferentes niveles porcentuales de oxígeno en el flujo de aire.

1.3 Marco teórico

La problemática del comportamiento de diferentes materiales cuando se queman y cómo su llama se propaga durante el proceso de combustión, es un tema que se ha venido estudiando ampliamente a través del uso de bancos de pruebas. (Fire Testing Technology Limited, 2003) (NASA, Office of Space Transportation Systems, 2008) (Rangwala, 2006). Los ensayos realizados han logrado determinar parámetros que definen la composición y estructura de una llama.

1.3.1 Ignición del fuego

Para que un material inicie el proceso de combustión es necesario disponer de tres factores: combustible, comburente y temperatura de ignición. En general, sin importar el tipo de combustible; sea éste, sólido, líquido o gaseoso; debe de alcanzar su temperatura de ignición antes de poder arder. La temperatura de ignición puede ser considerada como la temperatura mínima necesaria para que una mezcla aire combustible provoque el fuego, con o sin presencia de una chispa o llama que genere la ignición.

Atreya, A. en su estudio *Ignition of Fires* (Ignición del Fuego) determina que el tiempo para que ocurra la ignición depende de varios factores tanto internos como externos al sólido. Los factores externos son los siguientes. (i) La temperatura, composición y velocidad del flujo alrededor de la muestra sólida. Este flujo puede ser forzado o generarse de manera natural. (ii) La geometría de la muestra y el tamaño del área expuesta. Por otro lado, dentro de los factores internos a la muestra se encuentran las propiedades termofísicas y termoquímicas del sólido, así como su contenido de humedad.

1.3.2 Tipos de llama

Existen dos tipos de llamas, con características diferentes. Llama de difusión y llama premezclada.

La llama de difusión describe como el combustible y el oxidante se difunden uno hacia el otro y fuerzan una mezcla. Una vez que la mezcla se caliente lo suficiente, ésta se oxidará y el resultado visual será la llama. Hay que mencionar que la mezcla entre el combustible y el oxidante no es perfecta, lo que hace que la combustión sea lenta e ineficiente.

Por otro lado, una llama premezclada tiene una eficacia potencialmente mucho mayor en comparación con la llama de difusión. En la llama premezclada, el combustible y el oxidante se mezclan antes de que comiencen a reaccionar. (F. El-Mahallawy, 2002)

1.3.3 Propagación de una llama

La velocidad de propagación de una llama se determina mediante la capacidad de transferir calor necesario para generar pirolisis en un sólido y crear la ignición del combustible a su alrededor. Cuando la transferencia de calor y el flujo de aire se encuentran en la misma dirección, el proceso de dispersión de la llama es acelerado, de lo contrario el flujo es opuesto y la propagación de la llama ocurre de manera lenta.

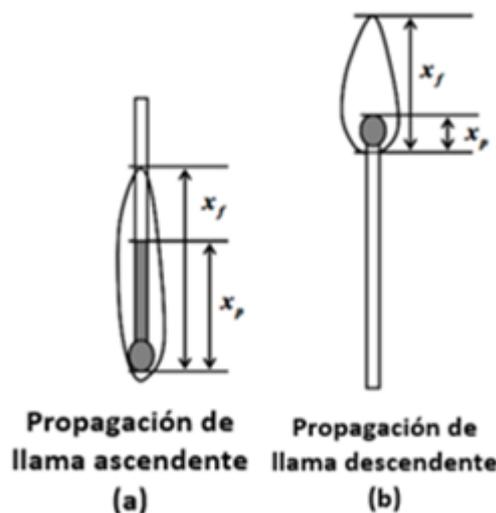


Figura 1.1 Propagación de llama en un fósforo

Fuente: (Rangwala, Flame Spread Analysis using a Variable B-Number, 2006)

En la Figura 1.1 se muestra la propagación de la llama en un fósforo. En el literal (a), después de la ignición, la llama muestra un recorrido acelerado a lo largo de la madera, a diferencia del literal (b), que toma más tiempo, dado que el flujo de aire y la dirección de transferencia de calor están en direcciones opuestas.

Explicando cada uno de los términos de la Figura 1.1, x_f es la longitud total de la llama visible, que va desde la base hasta la punta de la llama; x_p es la longitud del sólido en combustión también llamada longitud de pirólisis. Consecuentemente la velocidad de propagación estaría definida como $\frac{dx_p}{dt}$. (Rangwala, 2006)

El flujo de combustión (\dot{m}_f) se define como la masa de combustible liberada por la superficie en un periodo de tiempo determinado. Tal como se observa en la Figura 1.2, la distancia de separación de la llama ($y_f(x)$), es la distancia entre el perfil de llama y la superficie del material base, misma que varía de acuerdo a la velocidad del aire, las condiciones ambientales, tales como el porcentaje de oxígeno y temperatura del ambiente circundante; y las propiedades termodinámicas del material, así como su transmitancia térmica.

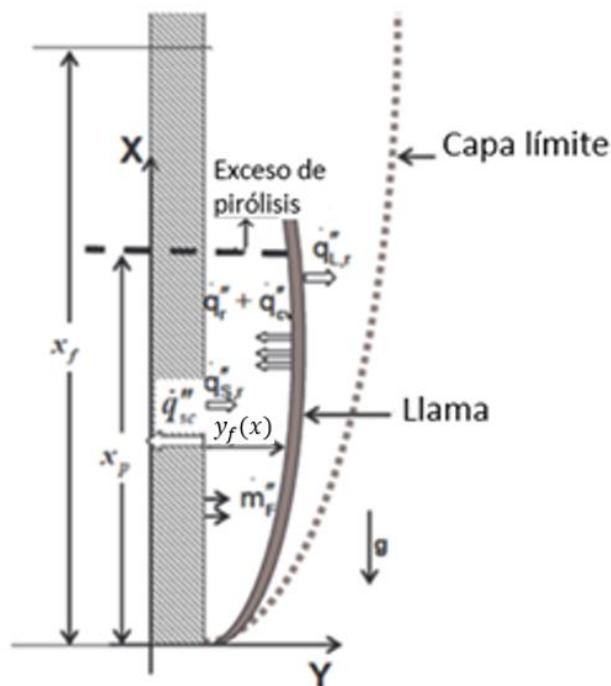


Figura 1.2 Distancia de separación y capa límite de una llama
Fuente: (Rangwala, Buckley, & Torero, 2009)

1.3.4 Número de transferencia de masa “B- Number”

Se utiliza un número adimensional denominado “B-Number”, también llamado número de transferencia de masa, como una medida de la eficiencia termodinámica del proceso de combustión.

Rangwala (2008) realizó una investigación en donde obtiene el “B-Number” de manera experimental a partir de la distancia de separación, medida entre la llama y el sólido, en una llama cuando ésta se extiende hacia arriba. Resultados experimentales demuestran que el “B-Number” no es constante, sin embargo, puede ser utilizado para predecir la tasa de combustión, la longitud de la llama y su tasa de propagación. (Rangwala, 2006)

La máxima representación del “B-Number” ocurre adiabáticamente, es decir, sin considerar las pérdidas de calor. En este punto, el “B-Number” es considerado constante y valor crítico puesto que representa al peor escenario de comportamiento de inflamabilidad de un material durante su combustión. (Rangwala, 2006)

1.3.5 Tasa de liberación de calor

La tasa de liberación de calor, dada por la ecuación 1.1, es la característica esencial que describe cuantitativamente qué tan grande es la llama generada durante un fuego. La tasa de combustión de un material se mide en kilovatios [kW] y corresponde a la velocidad a la que las reacciones de combustión producen calor. Se la expresa a través de la siguiente relación:

$$\dot{E} = \Delta H \dot{m}_f \quad (1.1)$$

Donde ΔH es el poder calorífico [MJ/kg] y \dot{m}_f es la tasa de pérdida de masa [kg/s]. El poder calorífico de un material es la cantidad de energía liberada por la reacción de combustión, que entrega un kilogramo de combustible al oxidarse en forma completa. Por otro lado, la tasa de liberación de calor es la variable principal que determina como el comportamiento de distintos materiales puede afectar al riesgo de incendios.

Para determinar el poder calorífico de un material, se realiza una prueba utilizando un calorímetro. El experimento consiste en introducir las probetas en un contenedor de acero antiexplosivo, tal como se muestra en la Figura 1.3 cuyo volumen se mantiene constante durante la reacción de combustión. El porta-muestra se sumerge en un contenedor aislado lleno de un líquido que absorbe el calor generado por la combustión. En el interior de la cámara una chispa eléctrica reacciona bajo la presencia de abundante oxígeno produciendo la ignición. (DiNenno & Walton, 2002)

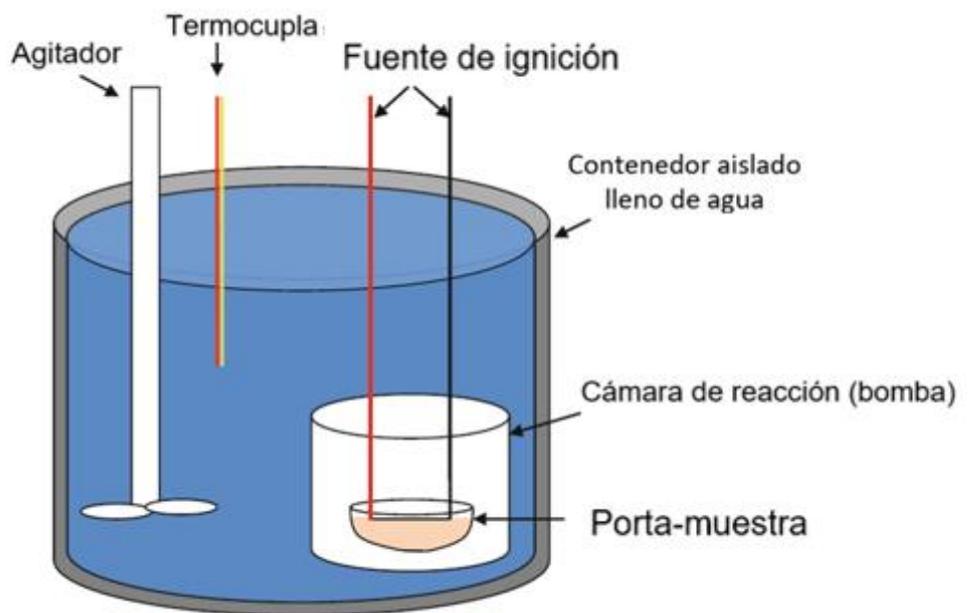


Figura 1.3 Calorímetro y sus partes
Fuente: (McAllister, Chen, & Fernandez, 2011)

1.3.6 Prueba de propagación de llama ascendente

La prueba de propagación de llama ascendente está diseñada con el objetivo de determinar las características de inflamabilidad de los materiales candidatos cuando se exponen a lo largo del borde inferior a una fuente de ignición. De manera que se ponen a prueba los factores de combustibilidad de la muestra, la tasa de propagación, las propiedades de auto-extinguible y el tiempo total de combustión. (NASA, Office of Space Transportation Systems, 2008)

Para los intereses de este proyecto, se desea mantener un flujo de aire controlado, proporcionar un flujo constante de aire/oxígeno durante la propagación de combustión. Con ello medir diversos parámetros de interés, como la velocidad del

frente de combustión, el calor disipado, la temperatura, perfil de la llama y producción de gases durante la combustión de los materiales a prueba.

Con respecto al banco de pruebas, según las recomendaciones (NASA, Office of Space Transportation Systems, 2008), éste debe tener un volumen suficiente para asegurar la combustión completa de la muestra. Además, éste incluirá una ventana o puerto de observación y deberá ser construido adecuadamente para garantizar una operación segura y fuera de peligro. Continuando con la cámara de prueba, debe contener entradas para la instrumentación, el alambre de encendido, inyección de aire/oxígeno y elementos adecuados para calentar la cámara de ser necesario. Por otra parte, los materiales utilizados para la construcción de la cámara de prueba, tales como juntas y sellos, no deben contribuir a la inflamabilidad del material de prueba. Finalmente, la cámara de prueba debe estar equipada con características de ventilación, para evitar la exposición del personal de trabajo a los subproductos de combustión potencialmente peligrosos.

1.3.7 Teoría de capa límite

La capa límite mostrada en la Figura 1.4, ocurre cuando un fluido fluye sobre una superficie y se crea un perfil de velocidad variable debido a la condición de no deslizamiento producto de la fricción entre las capas del flujo y la superficie de contacto. La velocidad aumenta desde cero (velocidad en la superficie de la placa) hasta su máximo valor U_{∞} que ocurre cuando la velocidad se vuelve constante y el flujo alcanza el espesor de su capa límite $\delta(x)$. (Muñoz Mejías, 2012) (White, 2004)

El espesor de la capa límite varía de acuerdo a la rugosidad y forma de la superficie de contacto, así como también del tipo de régimen del flujo. (Muñoz Mejías, 2012) (White, 2004)

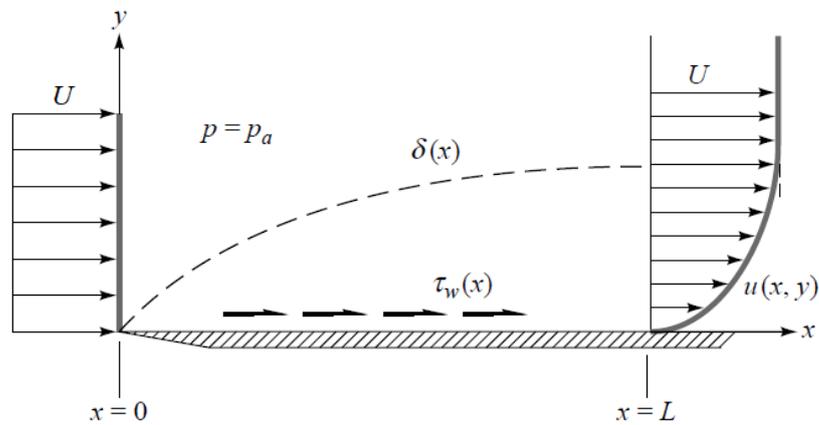


Figura 1.4 Crecimiento de la capa límite de una placa plana
Fuente: (White, 2004)

1.3.8 Dispositivos de reducción de turbulencia (Honeycomb)

El honeycomb es un conjunto de celdas diseñadas con el objetivo de reducir la turbulencia de un fluido en la dirección transversal del flujo. Los principales factores que definen a este arreglo son su longitud o profundidad (L_h), diámetro hidráulico de la celda (D_h) y su porosidad (β_h). (Brusca, Lanzafame, & Messina, 2011)

La porosidad del honeycomb, dada a través de la ecuación 1.2, se define como la razón entre el área de la abertura por donde circula el fluido y el área total del enmallado. (Martínez, Patiño, & Gaviria, 2010)

$$\beta_h = \frac{A_{\text{flujo}}}{A_{\text{total}}} \quad (1.2)$$

Bradshaw y Mehta (1979) realizaron una investigación en donde determinan ciertas reglas de diseño para túneles de viento de baja velocidad. En su estudio definieron el tamaño óptimo de una celda, tal que la profundidad sea de 6 a 8 veces su diámetro y su porosidad no menor a 0.8 (ecuaciones 1.3 y 1.4). En regímenes laminares, estos parámetros logran que el número de Reynolds local se mantenga alejado del régimen turbulento. (Mehta & Bradshaw, 1979)

$$6 \leq \frac{L_h}{D_h} \leq 8 \quad (1.3)$$

$$\beta_h \geq 0.8 \quad (1.4)$$

Los dispositivos de reducción de turbulencia pueden ser hexagonales, cuadrados o circulares, mostrados en la Figura 1.5. Los criterios de selección predominantes

para la selección de estos arreglos son la facilidad de construcción y las pérdidas de presión en el ducto. (Chicas Molina, 2012)

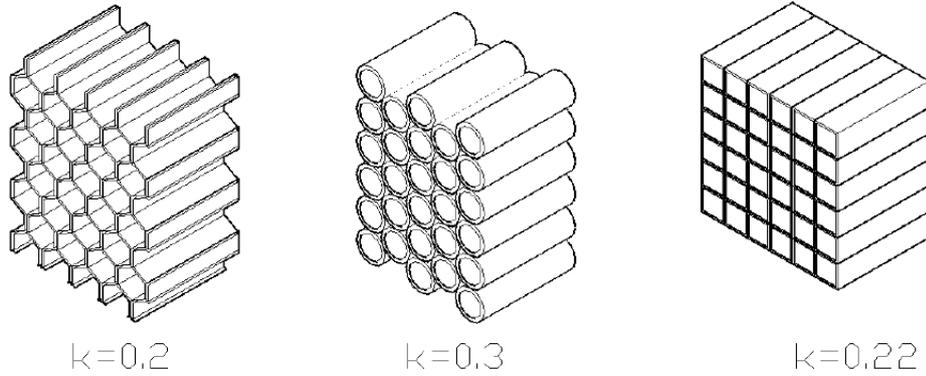


Figura 1.5 Coeficientes de pérdida de presión para diferentes geometrías del acondicionador.

Fuente: (Chicas Molina, 2012)

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA DEL DISEÑO

2.1 Bases y consideraciones de diseño

Los principales factores que influyen en el diseño del banco de pruebas son el tipo de material de las muestras y sus dimensiones; las condiciones del flujo de aire en el interior de la cámara de prueba, así como su velocidad y porcentaje de oxígeno; y la temperatura máxima en el interior de la cámara.

El banco de pruebas enfoca su diseño en el estudio de la propagación de una llama. Las dimensiones de las muestras fueron definidas al inicio del proyecto, tales como: ancho de 12 cm, el largo de 30 cm y el espesor de 10 - 25 mm.

El flujo de aire en el interior de la cámara de prueba debe de cumplir con ciertos parámetros para que pueda ser considerado como óptimo para la realización del experimento. En este proyecto se busca que el flujo sea de régimen laminar, que se encuentre en la región de fluido no viscoso y que la velocidad máxima del perfil desarrollado no supere los 27 cm/s. Hay que mencionar, además que el porcentaje de oxígeno que suministra el flujo de aire juega un papel importante en la geometría del perfil de la llama, por lo tanto, debe de ser considerado para el dimensionamiento de la cámara de prueba. A continuación, en la Figura 2.1 se muestra el esquema de las bases y consideraciones descritas anteriormente.

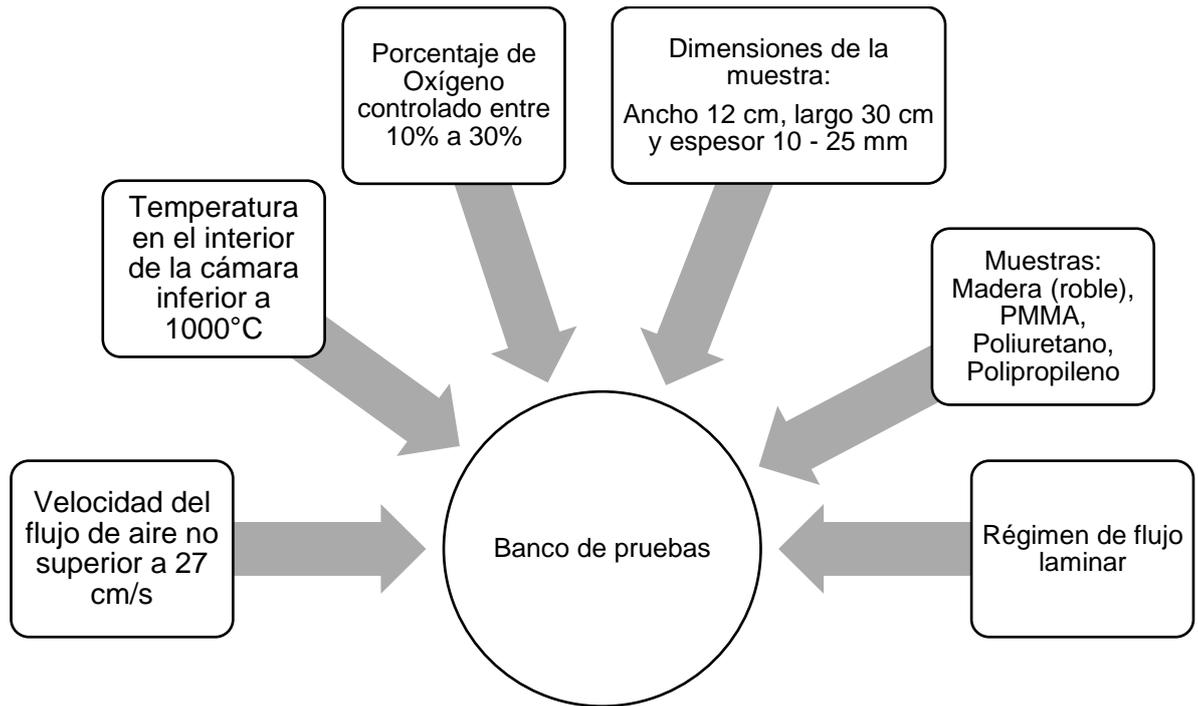


Figura 2.1 Esquema de bases y consideraciones de diseño

Fuente: Elaboración propia

2.2 Estrategia de diseño

El tipo de ignición de la muestra es un aspecto importante que debe ser tomado en consideración durante las primeras etapas de diseño, ya que determina qué se requiere que cumpla el banco de pruebas para que la propagación de la llama sea uniforme. Para esto, es necesario que el ambiente en el interior del área de trabajo sea controlado, es decir, que el flujo sea laminar y que su velocidad sea constante.

Tras la selección del tipo de ignición se determina el diseño de la cámara de pruebas y el dispositivo de reducción de turbulencia. El diseño de la cámara de prueba involucra la selección del material y su geometría; y el diseño del dispositivo para la sujeción de las muestras. El primer dimensionamiento de la cámara deberá ajustarse al tamaño de las probetas que se deseen analizar. Así mismo, estas primeras directrices serán tomadas en consideración para la realización del diseño del dispositivo de reducción de turbulencia.

Tomando en cuenta las consideraciones previas, la selección del ventilador será propuesta a partir de la cantidad de potencia requerida para la operación normal del sistema, es decir, cumpliendo con los requerimientos planteados al inicio del proyecto en función del flujo de aire y su velocidad. Estas características serán

debidamente evaluadas en un programa de computador analítico que permita determinar si el sistema cumple o no con todas las funciones anteriormente descritas. En el caso de que no se cumplan, se deberá regresar al diseño de la cámara de prueba y dispositivo de reducción de turbulencia para realizar modificaciones hasta que los resultados obtenidos del análisis correspondan a los esperados. Como ha sido mencionado anteriormente, la geometría del perfil de la llama afecta directamente al dimensionamiento de la cámara de prueba y, por lo tanto, del honeycomb.

Por último, se deberá realizar el análisis de costo y la elaboración de los planos para la posterior construcción del banco de pruebas. Se muestra a continuación, en la Figura 2.2, el diagrama de flujo del proceso de diseño.

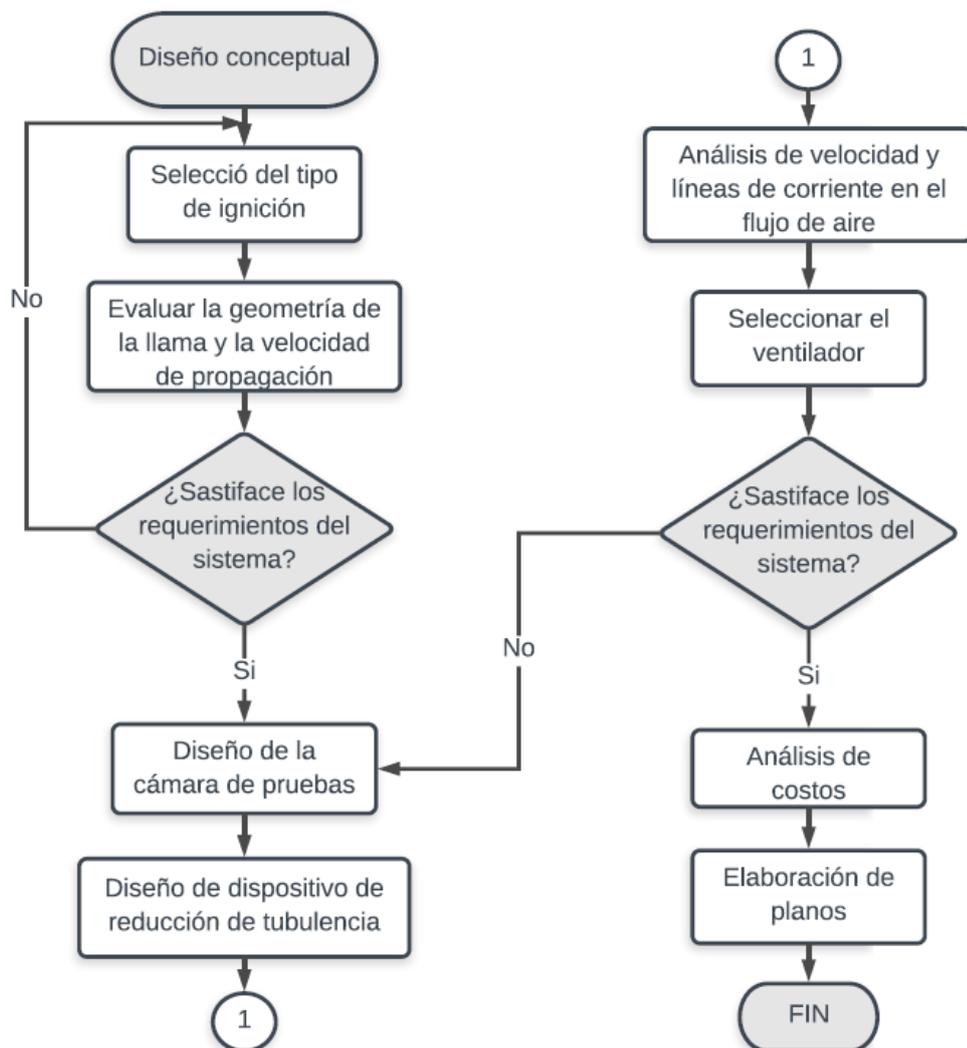


Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de diseño

Fuente: Elaboración propia

2.3 Alternativas de diseño

A continuación, en esta sección se explicará detalladamente cada una de las alternativas disponibles para el diseño del banco de pruebas, donde se incluyen: el diseño de la cámara de prueba, que involucra la selección del material; la fuente de ignición de la muestra; selección del ventilador y diseño del honeycomb.

2.3.1 Fuente de ignición

El fenómeno de ignición conocido como punto de ignición instantánea se produce cuando una llama se desarrolla cerca de la fuente de ignición y luego se propaga a través del volumen del reactivo (F. El-Mahallawy, 2002). A continuación, se muestran tres de las alternativas de fuentes de ignición que fueron analizadas para el diseño del banco de prueba. Para seleccionar la mejor alternativa de diseño, fue necesario realizar pruebas experimentales que permitieran determinar qué fuente de ignición posee el mejor comportamiento ante el tiempo, facilidad de ignición de la muestra y la uniformidad de la generación de la llama.

Para determinar la tasa de liberación de calor de las muestras, se determina el poder calorífico de las mismas a través del ensayo realizado en el Calorímetro (modelo isoperibólico 6200, marca Parr). Para la realización de la prueba, fue necesario extraer de las muestras pequeñas probetas de aproximadamente 0.7 – 1.4 g. A continuación, en la Tabla 2.1 se muestran los resultados obtenidos tras el ensayo.

Tabla 2.1 Poder Calorífico de las muestras

	Aglomerado MDF	Aglomerado X
<i>Masa [g]</i>	0.9886	0.9836
<i>Poder Calorífico ΔH [MJ/kg]</i>	17.4515	18.5323

Fuente: Elaboración propia

Alternativa 1: Ignición por una fuente regulada de voltaje

Se utiliza una resistencia eléctrica para envolver la base inferior del combustible sólido para posteriormente calentarlo por medio de un regulador de voltaje hasta alcanzar la temperatura de ignición de la muestra. Es importante mencionar que la resistencia fue debidamente seleccionada con el objetivo de evitar que ésta falle

antes de alcanzar las temperaturas deseadas. A continuación, en la Tabla 2.2, se muestran las especificaciones técnicas del regulador de voltajes utilizado.

Tabla 2.2 Especificaciones técnicas de Regulador de Voltaje

Marca	MASTECH
Modelo	TDGC2
Corriente de salida	0 - 10 A
Voltaje de salida	0 - 250 V
Potencia de salida	2500 kW
Voltaje de la Fuente	110 V
Frecuencia	60 Hz

Fuente: Elaboración propia

Considerando un voltaje en la entrada de 110 V, el regulador de voltaje se encargará de distribuir un voltaje a la salida de 0 a 250 V. Puesto que la corriente a la salida del regulador alcanza un máximo de 10 A, se logra determinar que la potencia máxima de la resistencia del circuito es 2,5 kW. Para este tipo de pruebas se recomienda el uso de resistencias de níquel- cromo ya que permiten trabajar a temperaturas de hasta 1000°C garantizando de esta manera la ignición para materiales que se encuentren por debajo del límite anteriormente mencionado. A través de las pruebas realizadas se logró determinar que mediante este método de ignición se logra alcanzar la uniformidad en la distribución y propagación de la llama. El tiempo de duración de la prueba fue de aproximadamente 15 min.

En las Figuras 2.3 y 2.4 se muestran los resultados de las pruebas realizadas para la alternativa 1.

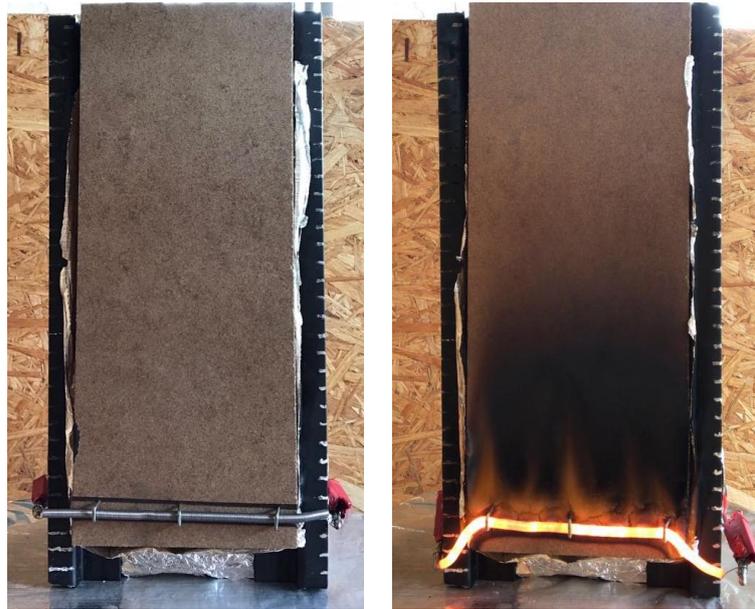


Figura 2.3 Ignición de madera de Aglomerado MDF con fuente regulada de voltaje
Fuente: Elaboración propia



Figura 2.4 Ignición de madera de Aglomerado X con fuente regulada de voltaje
Fuente: Elaboración propia

Durante las pruebas se recomienda que la resistencia esté en constante contacto con la superficie de la muestra, de esta manera se logra disminuir el tiempo requerido para la ignición de las muestras. Los resultados generales de los ensayos se encuentran en la sección de Apéndice A.

Alternativa 2: Ignición con un quemador de gas

Las llamas portátiles, como quemadores o sopletes, pueden encender cualquier material combustible que se encuentre a su alrededor. Para evaluar esta alternativa, se utilizó un mechero de Bunsen colocado en la parte inferior de la muestra de tal forma que la llama en combustión completa (llama azul, válvula de oxígeno completamente abierta) a penas entre en contacto con la superficie de la madera. Durante la prueba, se recomienda trabajar con este tipo de llama ya que alcanza temperaturas superiores a los 1300°C y permite que la ignición del material sea más rápida.

A pesar de que mediante este método se logra que la ignición de la muestra sea más rápida, la llama no se logró distribuir uniformemente a lo largo de todo el ancho de la muestra.

En las Figuras 2.5 y 2.6 se muestran los resultados de las pruebas realizadas para la alternativa 2.



Figura 2.5 Ignición de madera de Aglomerado MDF con mechero de Bunsen

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.6 Ignición de madera de Aglomerado X con mechero de Bunsen

Fuente: Elaboración propia

Aunque se consigue que el combustible sólido genere la combustión, no se logró mantener una ignición sostenible de las muestras en períodos menores a los 5 minutos sin el quemador encendido, por lo que se recomienda realizar las pruebas con el mechero encendido en todo momento. Los resultados generales de los ensayos se encuentran en la sección de Apéndice A.

Alternativa 3: Ignición por Resistencia eléctrica y mecha de combustible

El Alcohol actúa como un agente externo, un combustible extremadamente volátil, por lo que facilita el proceso de alcanzar las temperaturas de ignición del combustible sólido de la muestra. Dicho lo anterior, para las pruebas realizadas se procede a rociar con alcohol al 70% de Etanol una mecha ubicada en la parte inferior del porta-muestra, de tal manera que, al encenderla con el calor emitido por la resistencia, la llama se propague y produzca la ignición del combustible sólido en el menor tiempo posible. Los resultados generales de los ensayos se encuentran en la sección de Apéndice A.

En las Figuras 2.7 y 2.8 se muestran los resultados de las pruebas realizadas para la alternativa 3.



Figura 2.7 Ignición de madera de Aglomerado MDF con mecha de Alcohol al 70% de Etanol

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.8 Ignición de madera de Aglomerado X con mecha de Alcohol al 70% de Etanol

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se analizan los criterios de selección para cada una de las alternativas anteriormente mencionadas. En la Tabla 2.3, se definen las ponderaciones para cada uno de estos criterios y en la Tabla 2.4 se muestra finalmente la matriz de decisión para el tipo de fuente de ignición.

Tabla 2.3 Matriz de ponderación para alternativas de tipo de ignición

Criterios	Puntuación				
	1	2	3	4	5
<i>Ponderación [%]</i>					
<i>Uniformidad de la llama (50%)</i>	Muy baja	Baja	Medio	Alta	Muy alta
<i>Tiempo de prueba (32%)</i>	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
<i>Costo (18%)</i>	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.4 Matriz de decisión para el tipo de fuente de ignición

Criterios	Fuente de ignición		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
<i>Uniformidad de la llama</i>	5	1	4
<i>Tiempo de prueba</i>	3	5	4
<i>Costo</i>	4	2	3
	4.00	2.82	3.64

Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Cámara de prueba

Para el diseño de la cámara de prueba se requieren conocer dos factores importantes: el tipo de material y la estructura del soporte de la muestra, para esta última se debe considerar el montaje y desmontaje.

Material de la cámara de prueba

En la selección del material se determinaron que los factores que influyen directamente en el diseño son: costo, propiedades térmicas, manufacturabilidad y efectos ópticos. El criterio de efectos ópticos fue considerado en el análisis puesto que varía de acuerdo a su geometría de construcción, sea ésta curva o rectangular. Con respecto al criterio de las propiedades térmicas, se requiere que sea resistente a choques térmicos y comparar su temperatura máxima de uso continuo. Los criterios de costo y manufacturabilidad están asociados indirectamente, debido a su facilidad de adquisición.

Bajo estas consideraciones, se proponen las alternativas que se pueden observar con más detalle en la Tabla 2.5, en donde se comparan las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 2.5 Cuadro de comparación de ventajas y desventajas entre las alternativas propuestas

	Ventajas	Desventajas
<p><i>Alternativa 1:</i> <i>Vidrio de cuarzo</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Soporta temperaturas de uso continuo hasta 1100 °C. • Bajo coeficiente de dilatación térmica, no sufre choque térmico. • Buena visibilidad y transparencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos elevados de fabricación
<p><i>Alternativa 2:</i> <i>Vidrio templado</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de fabricación con geometrías planas rectangulares. • Baja expansión térmica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta distorsión visual en las imágenes reflejadas a través de este, siendo más evidente para casos de geometría curva. • Temperaturas de trabajo continuo relativamente bajas, 240 °C
<p><i>Alternativa 3:</i> <i>Vidrio de borosilicato</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente a choques térmicos. • Buena visibilidad y transparencia. • Altamente resistente a la corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturas de trabajo continuo relativamente bajas, 450 °C

Fuente: Elaboración propia

Entre las ventajas, se muestran similitudes para las tres alternativas, así como la baja expansión térmica y buena resistencia a choques térmicos. Por otro lado, difieren en su temperatura máxima de uso, facilidad de fabricación, transparencia y buena visibilidad debido a los efectos ópticos. A continuación, en la Tabla 2.6, se menciona el valor de la ponderación de los criterios de selección para la mejor alternativa, y en la Tabla 2.7 se muestra la matriz de decisión y la alternativa seleccionada.

Tabla 2.6 Matriz de ponderación para alternativas de material de la cámara de prueba

Criterios	Puntuación				
	1	2	3	4	5
<i>Ponderación [%]</i>					
<i>Costo (20%)</i>	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
<i>Propiedades térmicas (22%)</i>	Menor igual a 250°C	250°C < T ≤ 500°C	500°C < T ≤ 750°C	750°C < T ≤ 1000°C	Mayor a 1000°C
<i>Manufacturabilidad (25%)</i>	Muy baja	Baja	Medio	Alta	Muy alta
<i>Efectos ópticos (33%)</i>	No visible	-	Parcialmente Visible	-	Visible

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.7 Matriz de decisión para el material de la cámara de prueba

<i>Criterios</i>	Material de cámara de prueba		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
<i>Costo</i>	2	4	3
<i>Propiedades térmicas</i>	5	1	2
<i>Manufacturabilidad</i>	3	4	3
<i>Efectos ópticos</i>	5	3	5
	3.9	3.01	3.44

Fuente: Elaboración propia

2.3.3 Dispositivo para reducción de turbulencia

Los factores claves para el diseño del honeycomb como fueron explicados anteriormente, incluyen la longitud o profundidad (L_h), diámetro hidráulico de la celda (D_h) y la porosidad (β_h) del dispositivo. Las características del honeycomb se listan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Principales características del honeycomb

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro de la celda	D_h	9.5	mm
Espesor de la celda	s_{honey}	0.8	mm
Diámetro de la cámara de pruebas	d	240	mm
Rugosidad	Δ	1.5	μm
Longitud	L_h	60	mm
Porosidad	β_h	>0.8	-

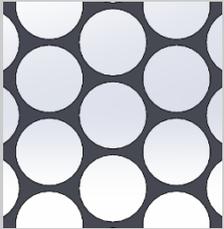
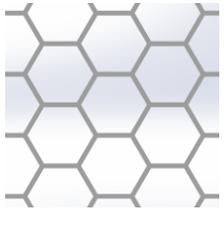
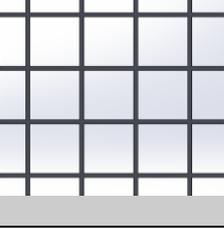
Fuente: Elaboración propia

Las alternativas que se muestran a continuación fueron diseñadas para una cámara de pruebas circular de diámetro 240 mm. Dada la relación L_h/D_h , se logra determinar la longitud recomendada para el honeycomb considerando un diámetro de la celda como 9.5 mm.

Los aspectos más importantes para la selección de este dispositivo están intrínsecamente ligados a la manufacturabilidad y pérdidas de presión. Considerando este primer aspecto, se buscaron alternativas que contemplaran la construcción de este dispositivo y utilizando como material policarbonato, bajo este criterio se evaluó la factibilidad de construcción de estos. Para cada alternativa se evaluaron que se cumplan con las restricciones principales para el diseño del honeycomb y se analizó las pérdidas de presión contempladas para

cada una de ellas. A continuación, en la Tabla 2.9, se muestran las características de cada alternativa propuesta.

Tabla 2.9 Alternativas de dispositivos para reducción de turbulencia

	Esquema	Características
<p><i>Alternativa 1:</i></p> <p><i>Honeycomb geometría con celda circular</i></p>		<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de pérdida de presión 0.1564
<p><i>Alternativa 2:</i></p> <p><i>Honeycomb geometría con celda hexagonal</i></p>		<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de pérdidas de presión 0.075
<p><i>Alternativa 3:</i></p> <p><i>Honeycomb geometría con celda rectangular</i></p>		<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de pérdidas de presión 0.1143

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 2.10, se menciona el valor de la ponderación de los criterios de selección para la mejor alternativa, y en la Tabla 2.11 se muestra la matriz de decisión y la alternativa seleccionada.

Tabla 2.10 Matriz de ponderación para alternativas de dispositivo de reducción de turbulencia

Criterios	Puntuación				
	1	2	3	4	5
<i>Ponderación [%]</i>					
<i>Facilidad de fabricación (60%)</i>	Muy baja	Baja	Medio	Alta	Muy alta
<i>Coeficiente de pérdida de presión (40%)</i>	Mayor igual a 0.15	-	$0.1 < k \leq 0.15$	-	Menor a 0.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.11 Matriz de decisión para el dispositivo de reducción de turbulencia

<i>Criterios</i>	Dispositivo de reducción de turbulencia (honeycomb)		
	Alternativa 1	Alternativas 2	Alternativas3
<i>Facilidad de fabricación</i>	5	3	3
<i>Coefficiente de pérdida de presión</i>	1	5	3
	3.4	3	3

Fuente: Elaboración propia

2.4 Diseño detallado

Dimensionamiento de la cámara de pruebas

Para determinar las dimensiones de la cámara de prueba es necesario calcular los espesores de las capas límites hidrodinámica y térmica en el interior del ducto de ensayo. La muestra por analizar deberá ser colocada en la región en donde el flujo se mantenga dentro del núcleo no viscoso con el fin de asegurar que la simulación sea realizada bajo condiciones de corriente libre. En la sección de análisis para velocidades medias en el orden de 0.15 a 0.27 m/s y con un Reynolds crítico en régimen laminar, el espesor de la capa límite hidrodinámica al final de la sección de ensayos es $\delta_H = 2 \text{ mm}$, dejando una sección de flujo no viscoso de 236 [mm] para ensayar las muestras. Sin embargo, hay que considerar además el espesor de la capa límite que se formará debido al calentamiento de las muestras. Este espesor varía de 19.78 a 23.53 mm con el incremento en la temperatura del flujo de aire al paso por el interior de la cámara de pruebas. Finalmente, se logra calcular la sección libre correspondiente a la distancia entre la capa hidrodinámica y térmica medidas a partir de la superficie en transferencia de calor, por lo que a partir del siguiente análisis se obtuvo:

$$e_{\text{libre}} = \frac{d}{2} - \delta_H - \delta_L - \frac{e_{\text{placa}}}{2} \quad (2.1)$$

Para un diámetro del cilindro de 240 mm se obtuvo una sección libre de aproximadamente 84,5 mm. A continuación, en la Figura 2.9 se puede observar la simulación de las capas límites, tanto térmicas como hidrodinámicas obtenidas en el interior de la cámara de pruebas.

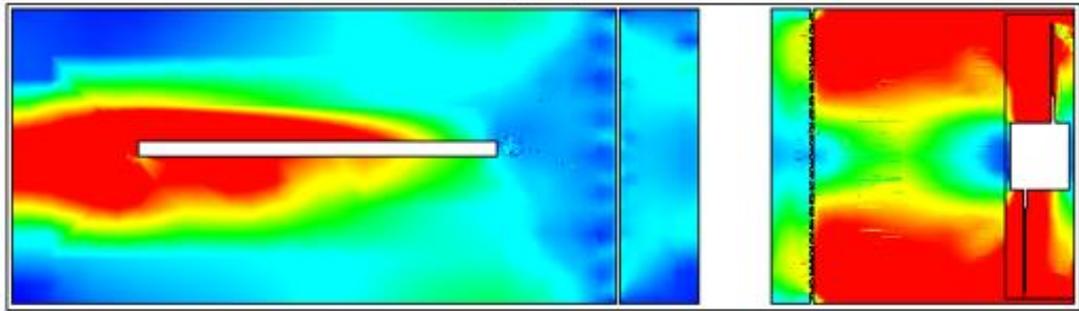


Figura 2.9 Distribución de capa límite térmica e hidrodinámica.

Fuente: Elaboración propia

Parámetros para la simulación del flujo de aire controlado

A continuación, se muestran los parámetros utilizados para dar inicio con la simulación. En el Apéndice C se muestran los pasos a seguir para realizar correctamente la simulación.

Parámetros constantes:

- Velocidad de rotación del ventilador: Se requiere una velocidad media que fluctúa de 0.15 a 0.27 m/s dentro de la cámara de pruebas, para mantener un flujo laminar, por lo tanto, se determinó que la velocidad de giro del ventilador es de 320 RPM.
- Presión atmosférica: En el apéndice B se muestran los cálculos realizados para determinar las pérdidas de presión en el interior del banco de pruebas. Para ello se consideran las pérdidas de presión debido a los accesorios utilizados en el interior del ducto, tales como las mallas protectoras, el honeycomb y el mismo ducto. En la Tabla 2.13. se muestran las pérdidas de presión por cada dispositivo, en donde se observa que las pérdidas totales de presión son despreciables. Por lo tanto, para el análisis se ingresó como parámetro presión atmosférica a la entrada y la salida de la cámara de pruebas.
- Tiempo de prueba: El tiempo máximo de prueba depende del número de iteraciones realizadas para llegar a converger una respuesta estable. Se fija un máximo de 160 iteraciones, para alcanzar los resultados de velocidad y temperatura del fluido dentro del ducto circular.

Parámetros variables:

- Tasa de generación de calor: La tasa de liberación de calor de una muestra se la determina a partir de la ecuación 2.5. Este parámetro varía de acuerdo al material de prueba que se está utilizando, ya que depende exclusivamente del poder calorífico y la tasa de pérdida de masa del material. En este trabajo se toma como material de muestra al PMMA, con un poder calorífico de 26,56 [kJ/kg] y la tasa de pérdida de masa de 0,02735 g/s (DiNenno & Walton, 2002).
- Material de prueba: Se analizaron distintos materiales de prueba, para conocer cuáles de ellos se encuentran dentro de los parámetros que regulan el uso del banco de pruebas. Entre los materiales analizados se incluyen la madera (roble), PMMA, polipropileno y poliuretano.

Con los parámetros iniciales, se procede a dar inicio a la simulación para demostrar la uniformidad del flujo de aire a lo largo de la cámara de pruebas. Los resultados se muestran en el Capítulo 3.

Diseño de celda con geometría circular

Para un ducto con sección circular se cumple que el diámetro hidráulico para este caso en particular es:

$$D_h = l_{\text{honey}} \quad (2.2)$$

$$D_h = 9.5 \text{ mm}$$

Por lo tanto,

$$57 \leq L_h \leq 76 \text{ [mm]}$$

La porosidad por otro lado se calcula a través de la solidez del enmallado que se define como:

$$\sigma_h = \frac{A_{\text{solid}}}{A_{\text{total}}} \quad (2.3)$$

En donde A_{solid} corresponde al área total del enmallado que es igual a 10305.5 mm² aproximadamente.

Es evidente que la solidez y porosidad del honeycomb son factores complementarios, por lo que para ambos se cumple la siguiente identidad:

$$\beta_h + \sigma_h = 1 \quad (2.4)$$

$$\beta_h = 1 - \sigma_h = 1 - \frac{A_{solid}}{A_{total}} \approx 0.8$$

Pérdidas de presión

En el banco de pruebas, la pérdida total de presión ocurre como consecuencia de las pérdidas de presión ocasionadas por los diferentes dispositivos que conforman al sistema. En general, las pérdidas están asociadas a los siguientes dispositivos: cámara de pruebas, honeycomb y mallas.

Tabla 2.12 Matriz de decisión para el dispositivo de reducción de turbulencia

Sección	Coefficientes de pérdidas K_i	Pérdidas de presión [Pa]
Cámara de pruebas	0.1043	0.003397
Honeycomb	0.1564	0.003828
Malla 1	3.873	0.1623
Malla 2	0.9244	0.03875
Total		0.2083

Fuente: Elaboración propia

Para la selección del ventilador, es necesario conocer las pérdidas de presión de tal forma que el ventilador proporcione la suficiente energía para vencer las pérdidas de carga ocasionadas por los diferentes componentes de dispositivo y se logre producir la circulación del aire a través del conducto.

Cálculo de transferencia de calor y temperatura superficial de la cámara de prueba

Conociendo que la tasa de liberación de calor es directamente proporcional a la tasa de pérdida de masa y al poder calorífico, tal como se muestra en la Ecuación 2.5

$$E = \Delta H \dot{m}_f \quad (2.5)$$

Por lo tanto, se determinó que $E = 19.52 \text{ kW/m}^2$. Mediante un balance de energía, es posible determinar las temperaturas del flujo a la salida del ducto, y a su vez la temperatura de superficie de la cámara de pruebas. Asumiendo que todo el calor

emitido por la muestra es liberado a través de calor por convección hacia el flujo de aire, como se muestra en la Ecuación 2.6

$$\dot{E} = q_{conv} \quad (2.6)$$

De esta manera se realiza un análisis de transferencia de calor para flujo interno en ductos a temperatura constante. De la Ecuación 2.7

$$q_{conv} = \dot{m}C_p(T_{mo} - T_{mi}) \quad (2.7)$$

Es por ello que se logra determinar que la temperatura del flujo de aire a la salida del ducto es $T_{mo}=142.06^{\circ}\text{C}$.

Es importante mencionar que T_{mo} es la máxima temperatura del aire que podría alcanzar a la salida del ducto, ya que se desprecia el calor liberado por radiación.

Continuando con el cálculo de la temperatura superficial, se asume que todo el calor generado por la muestra en combustión es recibido a través de la radiación liberada por la mitad del ducto que conforma la cámara de pruebas (ecuación 2.8).

$$E = q_{rad} \quad (2.8)$$

Y este calor recibido es liberado a través de convección forzada en el interior del ducto y a su vez por convección libre en el exterior.

Por lo tanto, se plantea un balance de energía, utilizando la temperatura de salida del flujo de aire como máxima, se llega a calcular que la temperatura superficial $T_s=196.43^{\circ}\text{C}$

Los cálculos realizados en esta sección se encuentran en mayor detalle en el Apéndice B.

Niveles de flujo Aire/Oxígeno

El nivel de oxígeno en el flujo de aire juega un papel importante ya que, al ser regulado, altera la geometría de la llama. Para disminuir o aumentar el porcentaje de oxígeno presente en el aire se considera la inyección de un flujo de nitrógeno y oxígeno, respectivamente. A través del uso de un programa computarizado se logra determinar el flujo necesario de oxígeno y nitrógeno para obtener una relación de aire/oxígeno porcentual en el rango de 15 a 30%. En la Figura 2.10 que se muestra a continuación, se observa el esquema del diseño del sistema de inyección de

Oxígeno / Nitrógeno a la cámara de pruebas. Es importante mencionar que en el esquema mencionado no se muestran los accesorios necesarios para la instalación del sistema de tuberías ni de los regulares de presión y flujo volumétrico requeridos durante la operación.

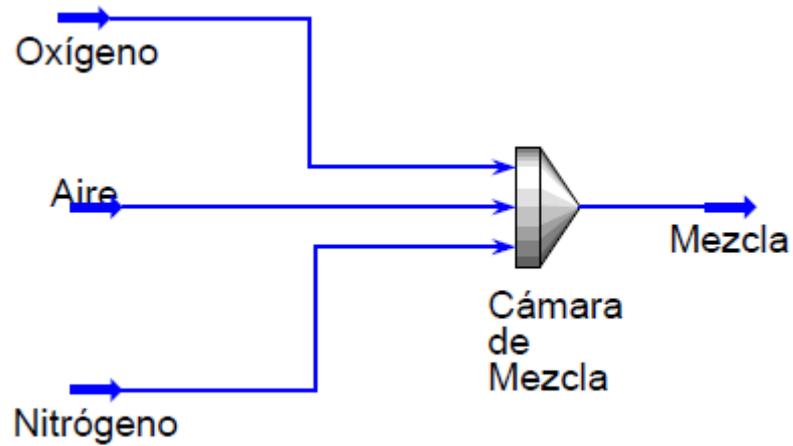


Figura 2.10 Sistema de inyección oxígeno / nitrógeno.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS

3.1 Ensamble banco de pruebas

Con los resultados obtenidos de los cálculos presentados en el capítulo anterior, se realizó el ensamble de cada una de las piezas que conforman el banco de pruebas. Para este aspecto se consideró la factibilidad de construcción de cada pieza, montaje y desmontaje de la muestra, y la facilidad para la realización de trabajos de mantenimiento y limpieza. El banco de pruebas está conformado por las diferentes partes que muestran en la Figura 3.1. (Los planos de cada elemento se encuentran en el Apéndice D).

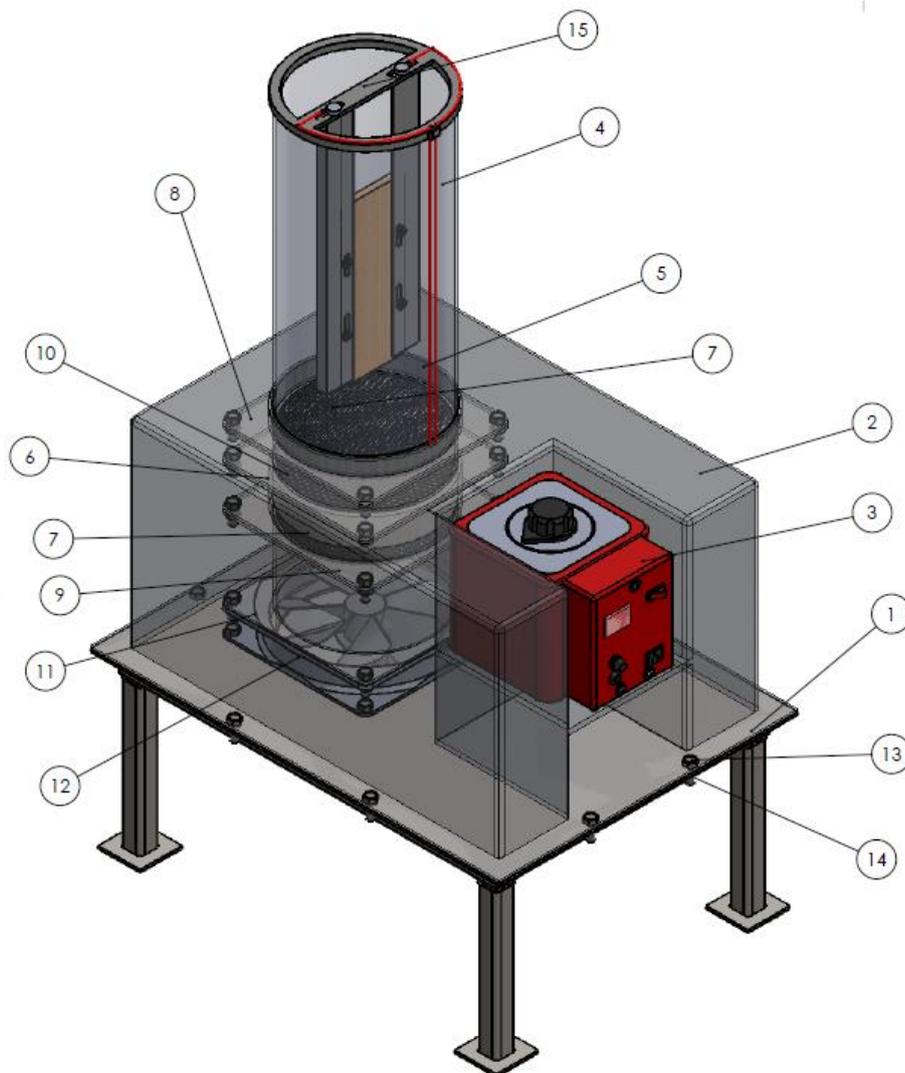


Figura 3.1 Componentes del banco de pruebas

Fuente: Elaboración propia

En donde se reconocen a las diferentes piezas que constituyen al ensamble en función de cada número visible en la Figura 3.1. Posteriormente, se detalla en el siguiente listado cada una de sus partes:

1. Mesa
2. Protector de mesa
3. Regulador de Voltaje
4. Cámara de Prueba
5. Caucho
6. Ducto interno superior
7. Mallas Protectoras de Ventilador
8. Semi-ducto superior
9. Ducto interno intermedio
10. Honeycomb
11. Ducto interno inferior
12. Ventilador Axial
13. Perno M12X30 DIN 933 – 8.8
14. Tuerca M12 DIN 934 – 8.8
15. Porta-muestra

A continuación, se describe brevemente cada uno de los componentes que integran al banco de pruebas.

▪ **Mesa**

La base de la mesa está compuesta por una estructura de cuatro extremidades diseñadas con perfiles tubulares cuadrados de 40x40x4 mm en acero ASTM A36. La plancha que soporta el peso de los ductos será de 5 mm de espesor tomando en consideración las deformaciones ocasionadas producto del peso de los demás componentes que conforman al banco de pruebas. La carga total soportada por la plancha de la mesa es de 270 N. A continuación, en la Figura 3.2, se muestra el resultado de la simulación, mostrando una deformación máxima de 0.022 mm.

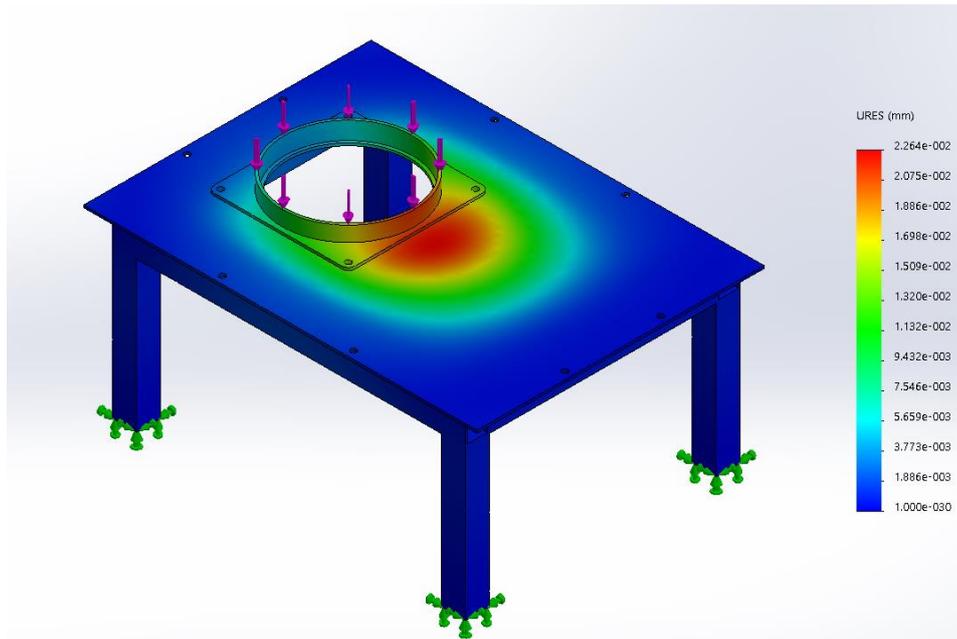


Figura 3.2 Simulación de carga estática mesa del banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

▪ **Protector de mesa**

El protector de la mesa fue diseñado con la finalidad de que los componentes del ducto de aire se encuentren protegidos y que, durante la realización de la prueba, el operador se encuentre seguro en todo momento.

▪ **Regulador de Voltaje**

Se pretende hacer uso del regulador disponible, ya que provee de suficiente potencia a la resistencia para que ésta pueda generar la ignición de la muestra. El equipo en mención posee las siguientes características:

- Potencia de salida 2500 W
- Voltaje de entrada 110 V / 60 Hz
- Voltaje de salida 0 – 250 V
- Corriente de salida 0 – 10 A

▪ **Cámara de prueba**

La cámara de prueba es un ducto circular, el cual fue diseñado en vidrio de cuarzo con la finalidad de que soporte temperaturas de hasta 1100°C. Los cálculos realizados para determinar la temperatura de la cámara durante la combustión del material fueron realizados a través de un análisis de transferencia de calor. Los

resultados mostraron que para un vidrio de espesor 5 mm, la máxima temperatura en su superficie es de 196.43°C, de esta manera, se asegura que el vidrio no presente fallas durante su operación.

▪ **Caucho**

Como medida de seguridad, durante el montaje y desmontaje de la cámara de vidrio, se incluyó un caucho, colocado en la sección superior (espesor de 2 mm), y en el porta-muestra (espesor despreciable), el cual cumplió con la función de evitar fracturas y daños al vidrio.

▪ **Ductos**

Fueron diseñados con la finalidad de contener y proteger los dispositivos principales de la cámara de prueba, estos incluyen al honeycomb y mallas protectoras para el ventilador (malla superior e inferior). El material de construcción seleccionado es el acero ASTM A36.

▪ **Reducción de turbulencia (Honeycomb)**

El dispositivo de reducción de turbulencia Honeycomb fue diseñado en base a los parámetros de diseño mencionados en el capítulo anterior. En general, las características que describen al honeycomb son:

- Material: Policarbonato
- Arreglo geométrico circular con un diámetro hidráulico de 9.5 mm.
- Colocado a una distancia de 20 cm con respecto al ventilador.

▪ **Malla protectora**

Dos mallas de acero fueron incluidas en el diseño del banco de pruebas, con el objetivo de proteger y evitar que caigan residuos de la muestra durante la combustión dentro del honeycomb y en el ventilador de tal manera que no se obstruya el paso del flujo de aire. Las dos mallas están colocadas dentro de los ductos, previamente mencionados.

▪ Porta-Muestras

El porta-muestras está conformado por los distintos componentes mostrados en la Figura 3.3. (Los planos esquemáticos de cada elemento se encuentran en el Apéndice D).

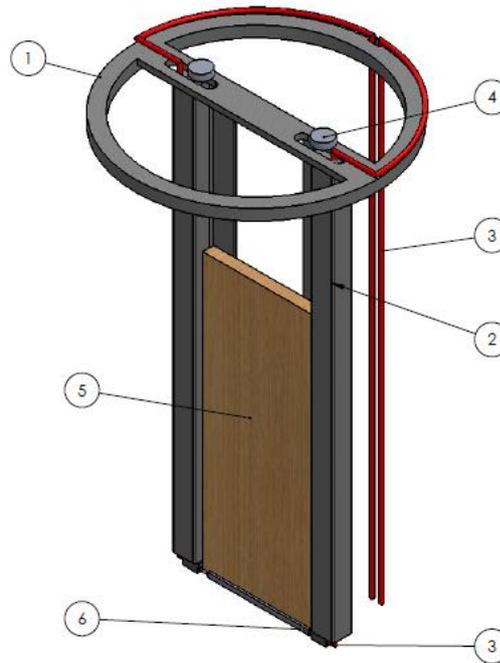


Figura 3.3 Componentes del Porta-muestra

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla en el siguiente listado cada una de sus partes, según el número en la referencia:

1. Soporte superior del Porta-muestra
2. Varilla del soporte del Porta-muestra
3. Cables eléctricos
4. Pernos de sujeción
5. Probeta
6. Resistencia eléctrica

Posteriormente, se describen brevemente los componentes del porta-muestra.

▪ **Estructura del Porta-muestra:**

Dado que para la selección de la fuente de ignición se eligió la alternativa 1 (ignición por una fuente regulada de voltaje), el porta-muestras se ajusta a dichos requerimientos, es decir, dimensiones y geometría requerida. Además, se proporciona la facilidad de incorporar un cable eléctrico que se conecte directamente a la resistencia eléctrica en la parte inferior de la muestra.

El porta-muestra debe ser diseñado de tal forma que soporte temperaturas elevadas superiores a los 500 °C. Es por este motivo que se ha decidido utilizar el acero AISI 4340 por su alto punto de fusión de 1427°C y su resistencia de 855 MPa. El factor de seguridad se determina a través de la Ecuación 3.1 que involucra el esfuerzo térmico al que es sometido la pieza y la resistencia propia del material.

$$\eta = \frac{\text{Resistencia}}{\text{Esfuerzo}} \quad (3.1)$$

El esfuerzo térmico fue calculado mediante un simulador, en donde se define que la máxima temperatura del porta-muestra en contacto con la muestra no supere los 500°C. En la Figura 3.4 se muestran las deformaciones provocadas por los esfuerzos térmicos, en estos resultados de la simulación están considerados como parámetros de entrada el tipo de material y el empotramiento en la parte superior del porta-muestra. De los resultados obtenidos se logró determinar el esfuerzo de von Mises como 573 MPa y un factor de seguridad de $\eta = 1.5$. Además se muestra una deformación máxima en la parte inferior de 1.8 mm.

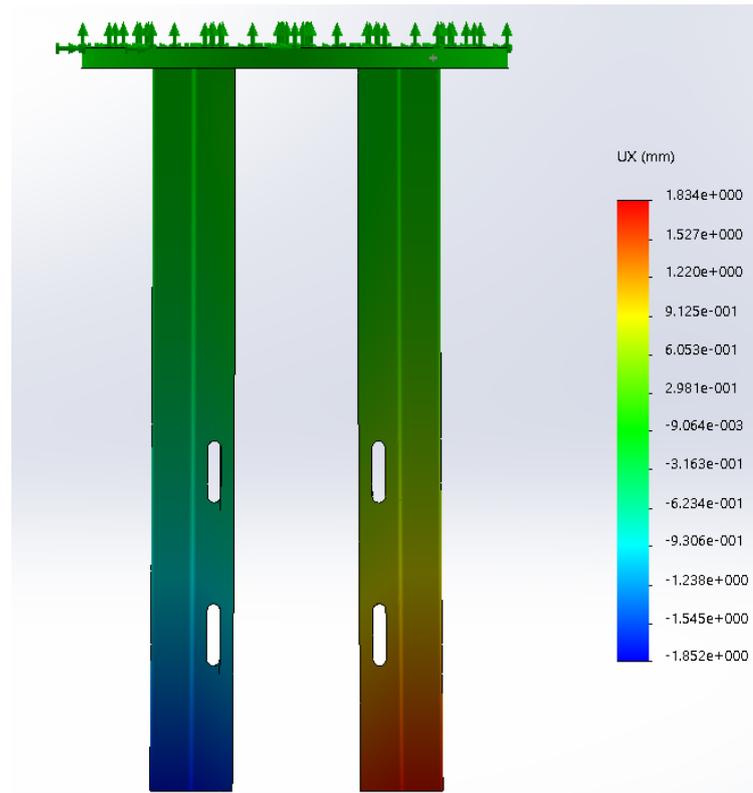


Figura 3.4 Simulación de deformación a causa de esfuerzos térmicos

Fuente: Elaboración propia

▪ **La muestra:**

Las dimensiones de las muestras fueron previamente definidas en el capítulo anterior, por lo tanto, se consideran las medidas de ancho 120 mm, largo 300 mm y un espesor variable entre 10 a 25 mm.

Por otro lado, los materiales tomados en consideración para este trabajo fueron:

- Aglomerado
- PMMA
- Polipropileno
- Poliuretano

▪ **Conexiones eléctricas:**

De las pruebas realizadas con material aglomerado, se determinó que una resistencia de 25 ohmios operando a 110 V generaba el calor suficiente para provocar la ignición del material de prueba. En general, se recomienda utilizar una resistencia plana rectangular, para que se mantenga en contacto con la muestra en todo momento.

Otra recomendación tomada por, (NASA, Office of Space Transportation Systems, 2008), es utilizar alambre de cromo níquel calibre No. 20 de valor nominal 2.3 ohmios por metro y suficientemente largo para envolver la muestra tres giros igualmente espaciados.

Finalmente se requiere utilizar un cable eléctrico de calibre No. 12 con aislamiento THW, el cual soporta hasta 250 V. El cable eléctrico conecta la resistencia con el regulador de voltaje.

3.2 Simulación flujo controlado dentro de la cámara de pruebas

Para la realización de las pruebas se desea mantener un flujo de aire constante en el interior de la cámara de pruebas, es por este motivo que se decidió hacer uso de un ventilador axial a la entrada del dispositivo que proporcionara dicho flujo. Sin embargo, se observa que el flujo de aire que desarrolla el ventilador posee turbulencias a lo largo de la cámara de pruebas. A continuación, en la Figura 3.5, se muestran las turbulencias generadas tras la utilización del ventilador axial.

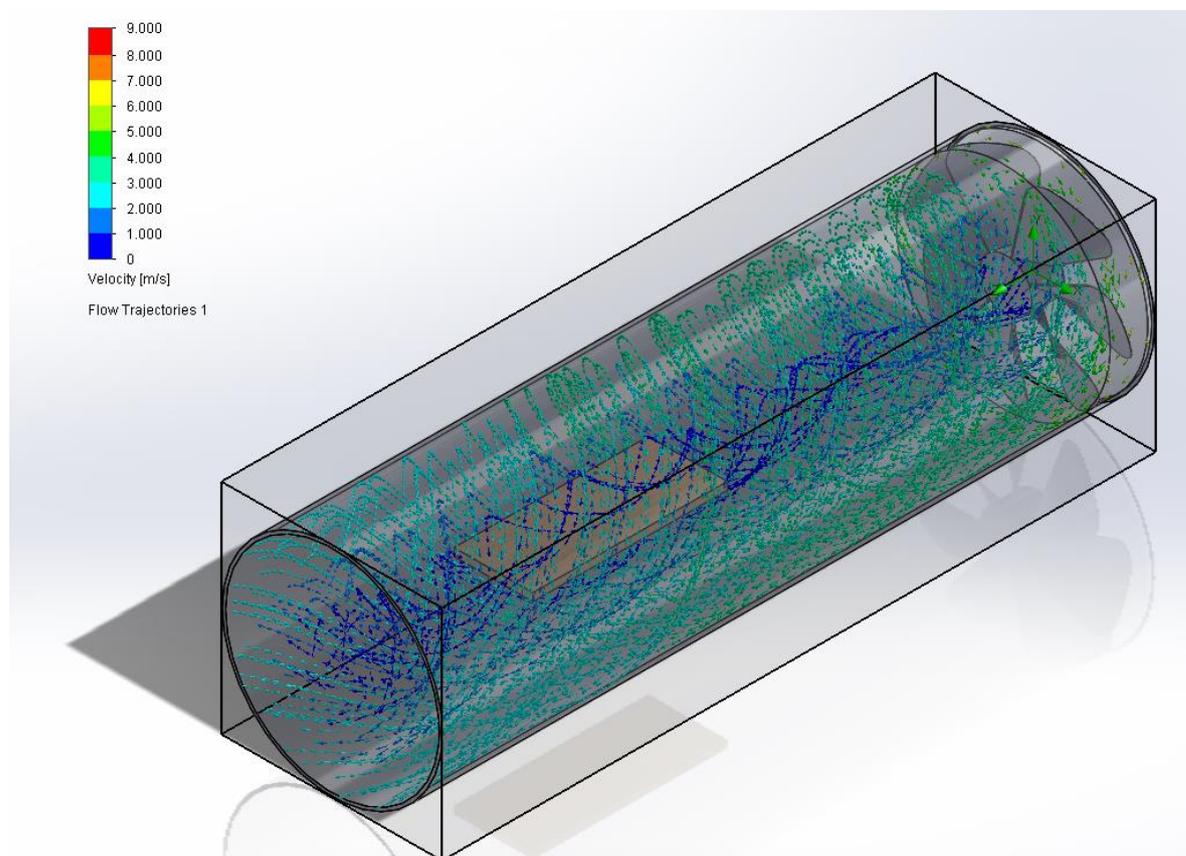


Figura 3.5 Simulación flujo de aire turbulento

Fuente: Elaboración propia

Para corregir las turbulencias que se generan producto del ventilador axial, se utilizaron dispositivos que permitieran transformar el flujo de régimen turbulento a laminar, de tal manera que las líneas de corriente generadas en el interior de la cámara se encuentren igual espaciadas unas de otras y que la velocidad sea constante. Los dispositivos utilizados en el diseño incluyen un honeycomb y dos mallas, mismas que son utilizadas además para fines de protección en caso de que exista alguna caída de partículas del material de prueba durante la combustión. La primera malla se utilizará como seguridad únicamente para protección del ventilador, mientras que la segunda malla servirá como protección inicial para el honeycomb y el ventilador, ambas mallas serán ubicadas en los extremos del honeycomb. En la Figura 3.6 se muestra cómo los dispositivos de reducción de turbulencia logran cambiar el régimen de un flujo de turbulento a laminar con pérdidas mínimas de presión y velocidad. En la cámara de pruebas se obtuvo que la velocidad máxima permisible para régimen laminar es de 0.2661 m/s.

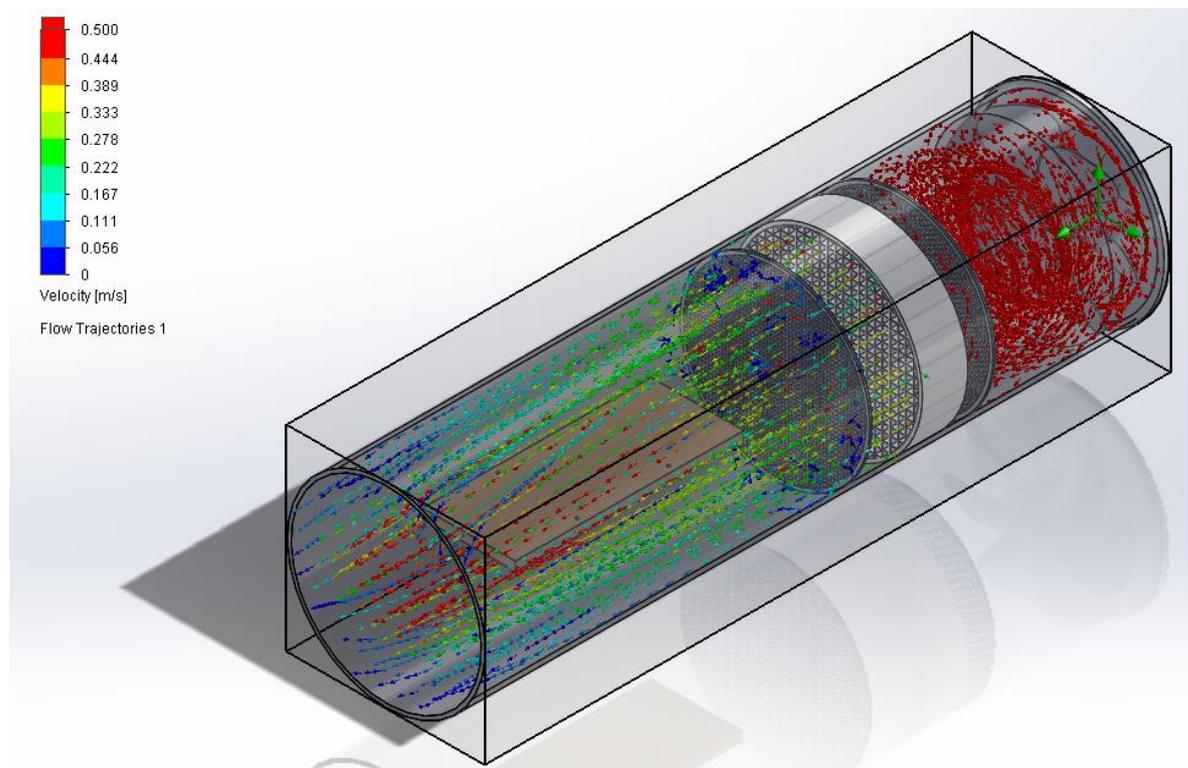


Figura 3.6 Simulación flujo de aire con el honeycomb y dos mallas protectoras

Fuente: Elaboración propia

Tras el uso de los diferentes dispositivos de reducción de turbulencia, existen pérdidas de velocidad en el flujo de aire en dirección axial al ducto. A través de las

simulaciones se logra observar la reducción de velocidades que ocasiona cada dispositivo tras el paso del aire por cada uno de ellos.

Inicialmente, se desea alcanzar una velocidad máxima media en el interior de la cámara de 0.2661 m/s, para esto fue necesario determinar a qué velocidad en RPM gira el ventilador para que esto se cumpla. De los resultados de la simulación se concluye que para alcanzar esta velocidad es necesario que el ventilador opere a máximo 320 RPM, a fin de garantizar las condiciones de flujo laminar en la sección de la cámara de pruebas. En la Tabla 3.1 se observa en qué medida cada dispositivo utilizado reduce la velocidad axial del flujo cuando la muestra se encuentra en calentamiento.

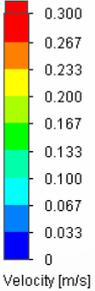
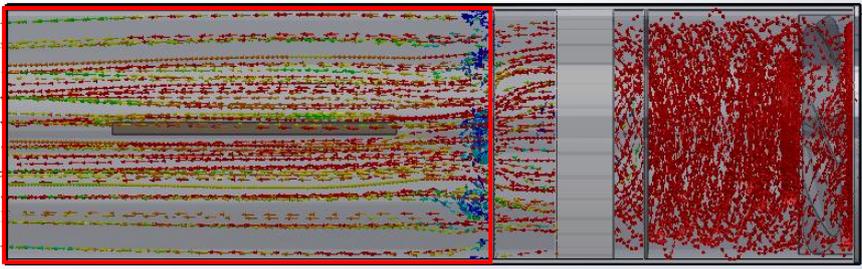
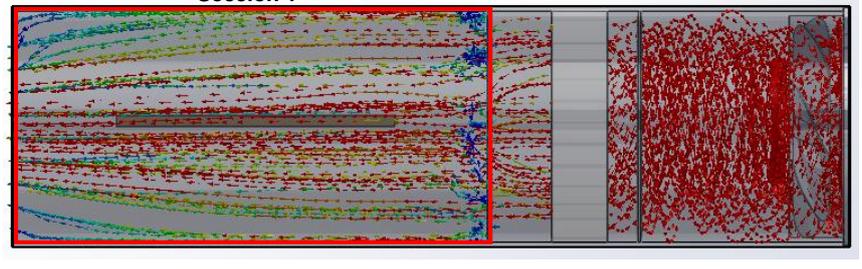
Tabla 3.1 Reducción porcentual de velocidad tras el paso por cada dispositivo utilizado

Dispositivo	Reducción [%]	Velocidad Entrada [m/s]	Velocidad Salida [m/s]
Malla Protectora Inferior	31%	1.7	1.17
Honeycomb	57%	1.15	0.5
Malla Protectora Superior	12.5%	0.4	0.35

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.2, que se muestra a continuación, se logra visualizar las diferencias que presenta el flujo de aire con y sin calentamiento. En la simulación sin generación de calor se observa que las líneas de corriente son paralelas unas con otras e igualmente distanciadas, sin embargo, cuando se genera calor en la muestra, las líneas tienen a converger a la salida del ducto. Por otra parte, el número de líneas de corriente en la zona de calentamiento se reduce considerablemente y la velocidad del flujo en contacto con la superficie en transferencia de calor no es igual a cero.

Tabla 3.2 Líneas de Corriente en flujo de aire con y sin calentamiento

Escala	Simulación	Condición
 <p>Velocity [m/s]</p>	<p style="text-align: center;">Sección 1</p> 	Sin Calentamiento
	<p style="text-align: center;">Sección 1</p> 	Con Calentamiento

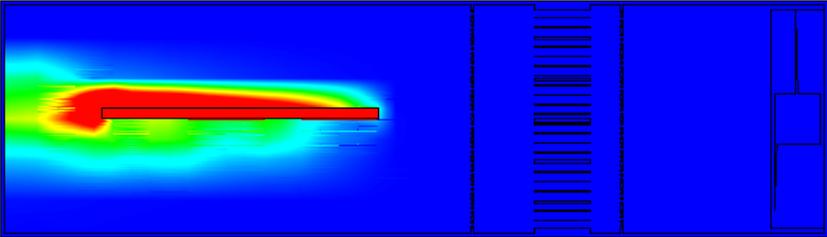
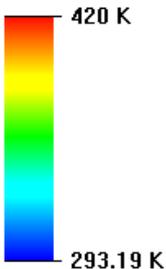
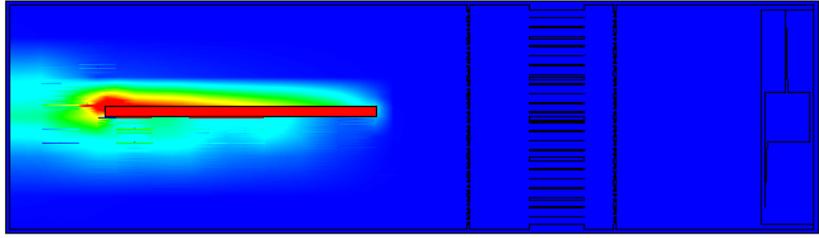
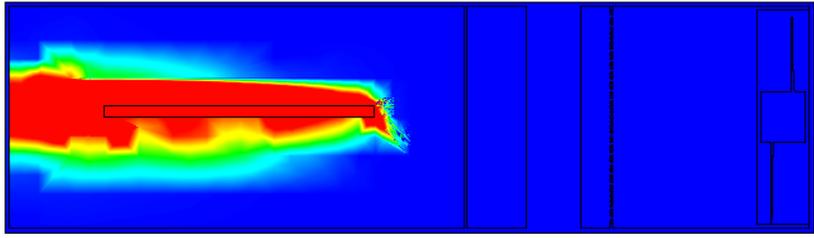
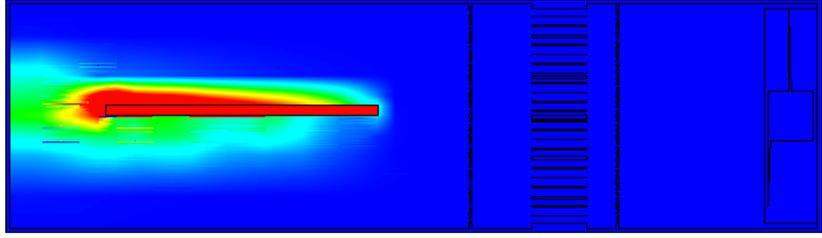
Fuente: Elaboración propia

3.3 Análisis de riesgo con los materiales de prueba

Para un seguro funcionamiento del banco de pruebas, fue necesario realizar una simulación mediante un programa de computador analítico, que probara el riesgo que pueden ocasionar distintos materiales, y cuáles de estos cumplen con las limitaciones propuestas, tales como, la tasa de liberación de calor y la temperatura máxima alcanzada dentro de la cámara de pruebas a causa de la combustión de dicho material. Para ello, con el simulador, fueron evaluados 4 materiales; PMMA, roble, poliuretano (elastómero) y polipropileno. Estos ensayos deben ser repetidos en caso de que se requiera realizar las pruebas experimentales con otro tipo de material que no haya sido evaluado en este trabajo. Los parámetros de entrada están detallados en el capítulo anterior.

A continuación, en la Tabla 3.3 se muestran los resultados producto de la simulación realizada. Tomando como referencia los cálculos realizados a partir del material de prueba PMMA, se alcanza una temperatura máxima a la salida del ducto de 146.06 °C y una temperatura superficial de la cámara de 196°C.

Tabla 3.3 Resultados de las pruebas de simulación

No.	Material	Prueba simulación	Rango de temperatura
1	PMMA		
2	Madera (Roble)		
3	Polipropileno		
4	Poliuretano (elastómero)		

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, utilizando la ecuación 1.1, se procedió a calcular la tasa de liberación de calor para cada material probado durante la simulación, como se muestra en la Tabla 3.4. Este parámetro influye directamente en los cálculos realizados de la simulación. Como limitante se toma como referencia los resultados obtenidos del material PMMA, con una tasa de liberación de calor de 19.52 kW/m^2 .

Tabla 3.4 Tasa de liberación de calor para cada material propuesto

No.	Material	Tasa de liberación de calor (kW/m ²)
1	PMMA	19.52
2	Madera (roble)	12.68
3	Polipropileno	32.84
4	Poliuretano (elastómero)	19.00

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Tabla 3.5 se muestran las temperaturas máximas alcanzada por el flujo de aire a la salida del ducto, luego de cada simulación realizada. Y en la Tabla 3.6 se muestra la temperatura calculada en la superficie del vidrio. En este caso se comparan los resultados obtenidos de la simulación, con los cálculos realizados. Es importante mencionar que, durante los cálculos realizados, se asumieron distintos parámetros para obtener los resultados en el peor escenario posible. (Los cálculos realizados y los parámetros asumidos están debidamente detalladas en el Apéndice B).

Tabla 3.5 Temperatura del aire a la salida del ducto

No.	Material	Temperatura simulada (°C)	Temperatura calculada (°C)
1	PMMA	110	142
2	Madera (roble)	70	109
3	Polipropileno	600	150
4	Poliuretano (elastómero)	90	140

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Temperatura en la superficie del vidrio

No.	Material	Temperatura máxima alcanzada (°C)
1	PMMA	196
2	Madera (roble)	143.45
3	Polipropileno	275
4	Poliuretano (elastómero)	188

Fuente: Elaboración propia

3.4 Mediciones del perfil de llama

Se tomaron las mediciones de la distancia de separación (y_f), del perfil de la llama a un porcentaje de 21% de Oxígeno, durante las pruebas realizadas con el aglomerado, para la determinación de la mejor alternativa de la fuente de ignición. Los parámetros iniciales de estas pruebas no cuentan con un flujo de aire controlado, debido a que fueron realizadas sin el ventilador y la cámara de vidrio, pero sirvieron como referencia inicial para mejorar el diseño del banco de pruebas.

En la Figura 3.7 se muestra el perfil de la llama, antes y después de ser aplicado el filtro, con el programa *ImageJ*.



Figura 3.7 A la izquierda se muestra el perfil de la llama, y a la derecha se muestran los filtros aplicados para medir la distancia de separación en el perfil de la llama

Fuente: Elaboración propia

Los datos de la distancia de separación fueron tomados con un intervalo de 10 segundos, para mostrar el progreso e incremento de la llama con respecto al tiempo. A continuación, en la Figura 3.8 se muestra la gráfica realizada a partir de los datos obtenidos.

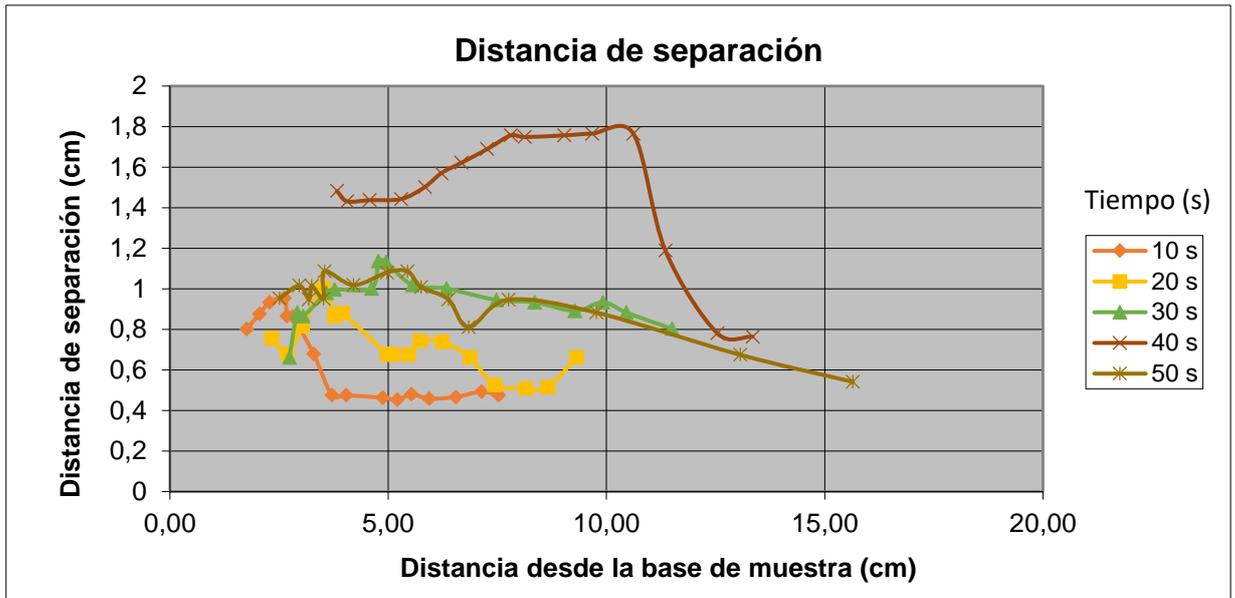


Figura 3.8 Distancia de separación en función de la propagación y el tiempo para el material aglomerado

Fuente: Elaboración propia

A partir de la distancia de separación se logra determinar el B-number.

3.5 Análisis de los niveles de oxígeno

En condiciones normales el porcentaje de oxígeno corresponde a un 21% mientras que con la inyección de oxígeno este porcentaje puede aumentar hasta un 30% y, por otro lado, con la inyección de nitrógeno disminuir hasta un 15%.

Tal como se muestra en la Figura 3.9, se requiere de un flujo másico de oxígeno de 0 a 56 kg/h para que el porcentaje de oxígeno incremente de 21 a 30%. Una vez obtenido el flujo másico, se determinó que el flujo volumétrico del oxígeno variaba de 0 a 9.4 m³/h. A partir de este parámetro se logra definir qué capacidad debe de tener el tanque que suministra el gas y qué regulador de flujo másico debe ser seleccionado. De acuerdo a los resultados obtenidos, la capacidad del tanque de oxígeno debe ser de 7 m³ de tal forma que, tras el desarrollo de cada prueba, considerando un tiempo de prueba de 15 min, el consumo del tanque corresponda al que se muestra en la Tabla 3.7.

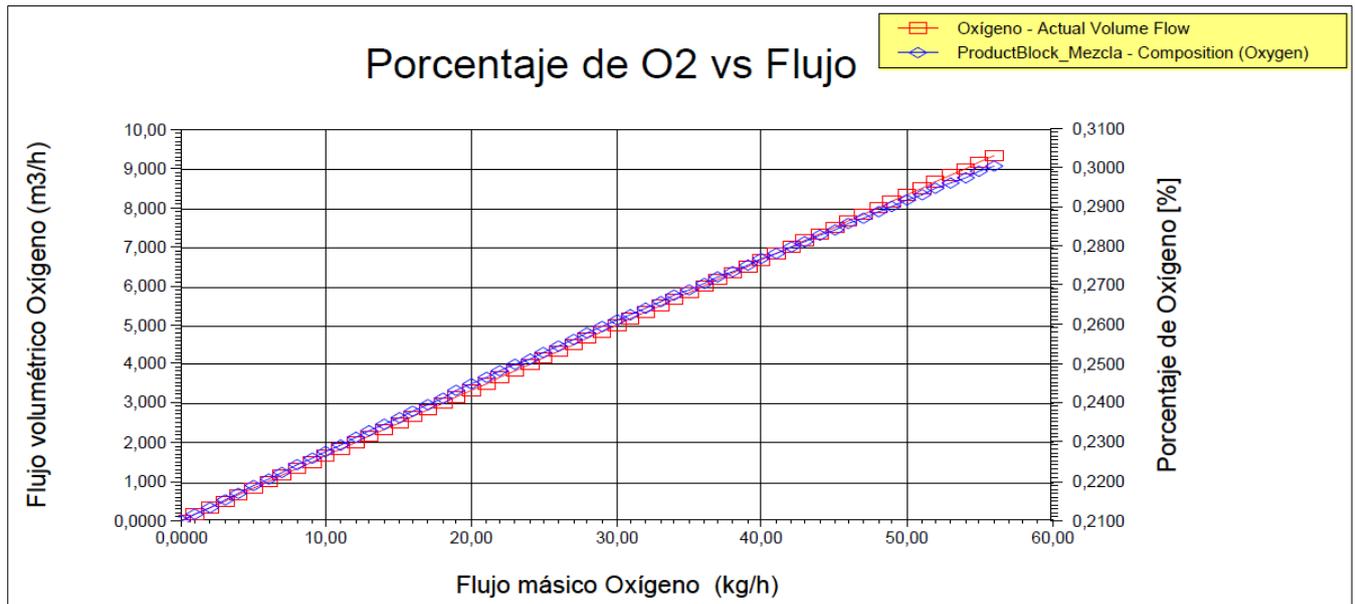


Figura 3.9 Relación de porcentaje de oxígeno en el flujo de aire, al introducir oxígeno

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Porcentaje de consumo de oxígeno tras cada prueba realizada

Porcentaje Oxígeno (%)	Flujo volumétrico [m³/h]	Flujo volumétrico [L/min]	Tiempo de prueba [min]	Porcentaje de consumo	Número de pruebas
22	1	16.7	15	2.78%	36
23	2	33.3	15	5.56%	18
24	3	50.0	15	8.33%	12
25	4	66.7	15	11.11%	9
26	5	83.3	15	13.89%	7
27	6	100.0	15	16.67%	6
28	7	116.7	15	19.44%	5
29	8	133.3	15	22.22%	4
30	9	150.0	15	25.00%	4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.10 se requiere de un flujo másico de nitrógeno de 0 a 150 kg/h para que el porcentaje de oxígeno disminuya desde el 21% hasta el 15%. Una vez obtenido el flujo másico, se determinó que el flujo volumétrico del nitrógeno variaba de 0 a 28 m³/h. A partir de este parámetro se logra definir qué capacidad debe de tener el tanque que suministra el gas y qué regulador de flujo másico debe ser seleccionado. De acuerdo a los resultados obtenidos, la capacidad del tanque de nitrógeno debe ser de 9 m³ de tal forma que, tras el desarrollo de cada prueba, considerando un tiempo de prueba de 15 min, el consumo del tanque sea tal como se muestra en la Tabla 3.8.

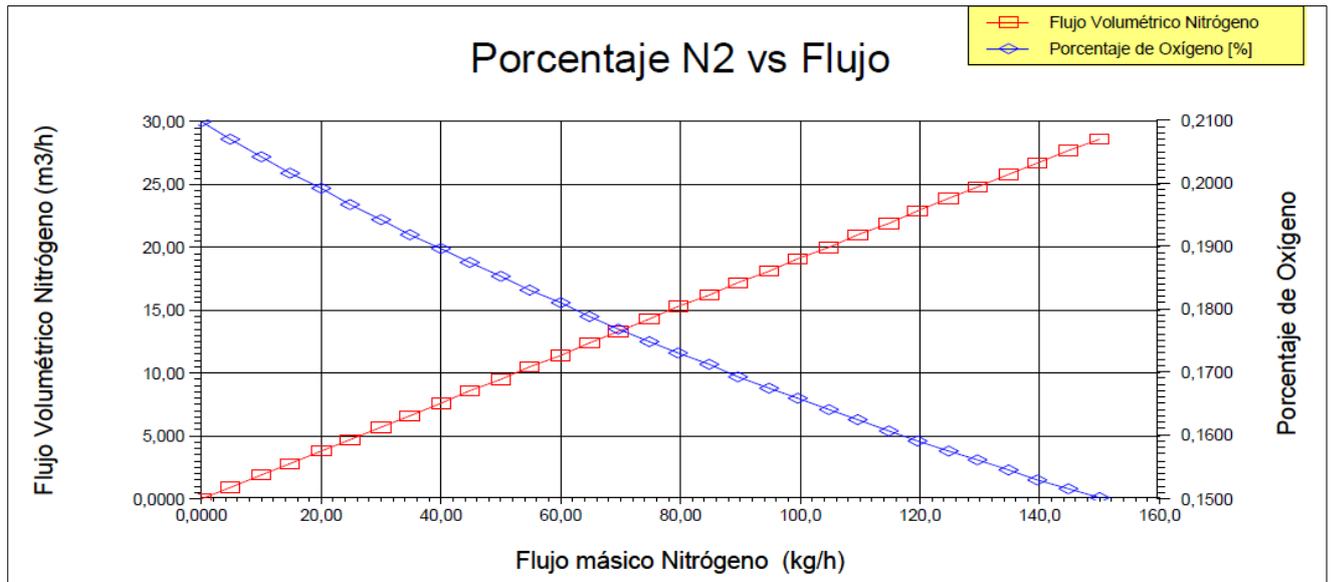


Figura 3.10 Relación de porcentaje de oxígeno en el flujo de aire, al introducir nitrógeno

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Porcentaje de consumo de nitrógeno tras cada prueba realizada

Porcentaje Oxígeno (%)	Flujo volumétrico [m3/h]	Flujo volumétrico [L/min]	Tiempo de prueba [min]	Porcentaje de consumo	Número de pruebas
20	3.5	58.3	15	9.72%	10
19	7.5	125.0	15	20.83%	4
18	11.5	191.7	15	31.94%	3
17	17.5	291.7	15	48.61%	2
16	22	366.7	15	61.11%	1
15	28	466.7	15	77.78%	1

Fuente: Elaboración propia

3.6 Análisis de costos

Los valores estimados para la construcción del banco de pruebas están detallados en la Tabla 3.9, estos costos incluyen la mano de obra, transporte y extras, tales como pernos y tuercas. Además, se incluyen los costos del variador de voltaje, las mallas protectoras y el honeycomb. El costo total estimado es de \$2099 dólares.

Tabla 3.9 Detalle de los costos para construcción de banco de pruebas

No.	Descripción	Precio unitario	Cantidad	Total
1	Mesa	\$ 220	1	\$ 220
2	Protector de mesa	\$ 360	1	\$ 360
3	Ducto Mesa Inferior	\$ 80	1	\$ 80
4	Ducto Mesa Intermedio	\$ 70	1	\$ 70
5	Ducto Mesa Superior	\$ 70	1	\$ 70

6	Semi-ducto superior	\$ 30	1	\$ 30
7	Porta-muestra	\$ 195	1	\$ 195
8	Honeycomb	\$ 150	1	\$ 150
9	Cámara de prueba	\$ 900	1	\$ 900
10	Resistencia eléctrica	\$10	1	\$10
11	Malla de acero	\$7	2	\$14
Total				\$2099

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, es importante mencionar que al agregar los valores de las 2 cámaras de video incrementan el costo considerablemente, debido a la calidad de imagen deseada. Lo mismo sucede con el regulador de voltaje y los tanques de oxígeno/nitrógeno, ya que el costo tiende a incrementar o disminuir según la potencia de salida requerida, y del volumen requerido, respectivamente.

CAPÍTULO 4

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Una vez concluidas las pruebas pertinentes, se lograron determinar los parámetros de funcionamiento del banco de pruebas. En este trabajo se determinó la velocidad y temperatura máxima de operación en el interior de la cámara de pruebas. Además se simuló el flujo necesario que se requiere para mantener un ambiente controlado de aire/oxígeno. Por último, se diseñó un dispositivo para reducir la turbulencia generada en la salida del ventilador para así obtener condiciones de flujo de aire en régimen laminar.

4.1 Conclusiones

Dentro de la cámara de pruebas fue necesario que el flujo de aire se encontrara en régimen laminar. A partir de esta condición se determinó la velocidad máxima de 0.26 m/s para la cual se mantiene un perfil de llama uniforme. La dirección del vector velocidad del flujo de aire es aleatoria y turbulenta a la salida del ventilador, por lo cual se utilizó un dispositivo reductor de turbulencia (honeycomb) con la finalidad de obtener un flujo con velocidad unidireccional en el sentido axial del ducto garantizando la uniformidad deseada.

Para el análisis del perfil de una llama es necesario mantener controlado la relación de flujo aire/oxígeno. Para variar el nivel de oxígeno en el aire en un rango de 15 a 30% se introdujo un flujo de oxígeno y nitrógeno además del flujo de aire producido por el ventilador. Dentro de una cámara de mezcla aire y oxígeno o nitrógeno se mezclan y como resultado se obtiene un flujo de aire con un nivel superior o inferior de oxígeno, respectivamente. Los flujos de oxígeno y nitrógeno fueron calculados en función a los porcentajes de oxígeno deseados en el aire. En el sistema de conexión tanque (O_2 y N_2) y cámara de pruebas se tuvo que analizar el diseño de tuberías para así seleccionar la correcta válvula reguladora de presión y su flujo de salida.

Se determinaron las temperaturas máximas en operación en la superficie del vidrio de la cámara de prueba. Con los materiales propuestos se obtuvo una temperatura

máxima de 275°C, demostrando que el vidrio de cuarzo cumple con las limitaciones presentes para el funcionamiento.

La realización de los ensayos experimentales de la propagación de la llama, permitieron determinar el tipo de ignición de la muestra. Las pruebas no se realizaron en un ambiente controlado, pero sirvieron para mejorar el diseño del banco de pruebas.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda incluir un sistema de medición de masa que permita conocer la pérdida de masa por unidad de área durante la ejecución de la prueba. Además, se recomienda colocar un extractor de tipo campana para el uso del banco de pruebas dentro de un laboratorio, debido a la liberación de gases producto de la combustión. Con el extractor, se recomienda incluir un sistema de medición de los gases liberados, para así medir el nivel de toxicidad y otros parámetros relevantes.

Es recomendable colocar termocuplas a lo largo de la muestra, para conocer las temperaturas alcanzadas durante la combustión, y así medir con exactitud las temperaturas de ignición y pirolisis de la muestra durante el ensayo experimental. Además, facilitará el cálculo para determinar la tasa de calor liberada.

El espacio de trabajo requerido para ubicar el banco de pruebas dentro de un laboratorio, incluyendo el posicionamiento de las dos cámaras de video, es de 0.87 x 1.08 m, y una altura de 1.24 m. el dimensionamiento del equipo fue desarrollado para realizar ensayos en muestras de ancho 12 cm, largo 30 cm, y espesor de 10 – 25 mm.

Se recomienda revisar el nivel de los tanques de oxígeno y nitrógeno antes de la realización de la prueba de tal forma que el contenido del gas que se requiera abastezca en su totalidad el periodo de prueba.

Por otro lado, de requerir disminuir los costos de fabricación del equipo, se recomienda analizar el uso del vidrio de Borosilicato para la construcción de la cámara de pruebas, sin embargo, habrá que considerar que este material sólo permite temperaturas de trabajo continuo de hasta 450°C.

BIBLIOGRAFÍA

- Arifuzzaman, M., & Mashud, M. (2012). Design Construction and Performance Test of a Low Cost Subsonic Wind Tunnel. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 83-92.
- Atreya, A. (1998). Ignition of fires. Michigan: The Royal Society.
- Audouin, L., Torero, J., Mängs, O., & Rigollet, L. (2005). An Example of the Use of Standard Flammability Criteria for Performance Analysis of Materials: Polycarbonate and PMMA. Saint Paul lez Durance, Edinburgh, Stockholm.
- Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2011). Low-Speed Wind Tunnel: Design and Build. En J. D. Pereira, *Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments* (págs. 189-219). Catania, Italy: Nova Science Publishers, Inc.
- Chicas Molina, F. E. (2012). Diseño y Construcción de un Túnel de viento. En U. C. Cañas", *Diseño y Construcción de un Túnel de viento*. El Salvador.
- De Dietrich, P. S. (2017). *Propiedades del vidrio de borosilicato*. Obtenido de <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/esmalte-vidrio-de-borosilicato/las-propiedades-del-vidrio-de-borosilicato>
- DiNunno, P. J., & Walton, W. D. (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (Vol. Section 3). National Fire Protection Association Quincy, Massachusetts; Society of Fire Protection Engineers Bethesda, Maryland.
- EUROGLAS. (s.f.). *Ficha Técnica Cristal Templado*.
- F. El-Mahallawy, S. E.-D. (2002). Fundamentals and technology of combustion . ELSEVIER SCIENCE Ltd.
- Fire Testing Technology Limited. (2003). *Users' Guide for the Fire Propagation Apparatus (FPA)*. United Kingdom.
- Glass, G. C. (15 de June de 2009). Obtenido de Fused Silica/Quartz Glass - Properties and Applications of Fused Silica/Quartz Glass by Goodfellow Ceramic & Glass Division: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4766>

- León, A., & Carmona, R. (2009). Estudio comparativo del Punto de Ignición y Avance de llama en Madera de Pino radiada versus un compuesto de Madera-Resina Termoplástica. Santiago, Chile: Departamento de Ingeniería de la Madera Fac. de Cs. Forestales U. de Chile.
- Martínez, R., Patiño, G., & Gaviria, G. (2010). Dispositivos de Reducción de Turbulencia en Túneles de viento. En S. B. Universidad Nacional de Colombia, *Revista Colombiana de Física, Vol 42, No. 3 de 2010* (págs. 383-386). Colombia.
- McAllister, S., Chen, J.-Y., & Fernandez, C. (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. New York: Springer New York.
- Mehta, R., & Bradshaw, P. (1979). Technical Notes. En T. A. Society, *Design rules for small low speed wind tunnels* (págs. 443-449). London.
- Muñoz Mejías, A. (2012). *Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- NASA, Office of Space Transportation Systems. (2008). Flammability, offgassing, and compatibility requirements and test procedures . En N. A. Administration, *NASA, Office of Space Transportation Systems*. United States: NASA, Office of Space Transportation Systems.
- Overholt, K., Gollner, M., & Rangwala, A. (2009). Characterizing the Flammability of Corrugated Cardboard using a cone Calorimeter. *6th U.S. National Combustion Meeting*, 1-21.
- Rangwala, A. S. (2006). Flame Spread Analysis using a Variable B-Number. En I. A. Science, *Fire Safety Science- Proceedings of the Ninth International* (págs. 243-254). Worcester Polytechnic Institute: Department of Fire Protection Engineering.
- Rangwala, A. S., Buckley, S. G., & Torero, J. L. (2009). Verification of the constant B-number assumption while modeling flame spread. Worcester Polytechnic Institute: Department of Fire Protection Engineering .
- RIMAC. (2014). *Incendios / Fuentes de ignición*. Obtenido de Rimac seguros: <http://prevencionrimac.com/riesgopatrimoniales/Herramientas/Causa-siniestros/Incendios/Fuentes-ignicion>

White, F. M. (2004). Flujo viscoso en conductos. En F. M. White, *Mecánica de Fluidos* (págs. 335-414). España: McGraw-Hill Inc.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Resultados de la prueba experimental para la selección de la fuente de ignición.

En las Tablas A.1 y A.2 se presentan las medidas iniciales de las muestras utilizadas en las pruebas experimentales.

Aglomerado X

Tabla A.1 Medidas de Aglomerado X

No. Medición	Espesor ± 0.005 [mm]	Ancho ± 0.005 [mm]	Longitud ± 0.05 [cm]
1	12,10	121,18	30,20
2	12,20	121,18	30,20
3	12,50	121,10	30,20
4	12,20	121,18	30,20
5	12,04	121,06	30,20
6	12,22	120,90	30,20
7	12,20	121,00	30,20
8	12,26	120,98	30,20
9	12,40	120,96	30,20
10	12,16	120,98	30,20
Promedio	12,23	121,05	30,20

Fuente: Elaboración propia

Aglomerado MDF

Tabla A.2 Medidas de Aglomerado MDF

No. Medición	Espesor ± 0.005 [mm]	Ancho ± 0.005 [mm]	Longitud ± 0.05 [cm]
1	26,00	121,00	30,20
2	25,98	120,70	30,20
3	26,18	121,10	30,20
4	26,00	121,10	30,20
5	26,00	121,00	30,20
6	26,00	121,18	30,20
7	26,00	121,26	30,20
8	26,08	121,20	30,20
9	26,10	121,20	30,20
10	26,10	121,00	30,20
Promedio	26,04	121,07	30,20

Fuente: Elaboración propia

Prueba de ignición por una fuente regulada de voltaje

Aglomerado X

Prueba 1:

- Tiempo hasta ignición: 0:01:00
- Tiempo de ignición: 0:00:13
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 2.50 cm/min

Prueba 2:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:36
- Tiempo de ignición: 0:00:07
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 3.04 cm/min

Prueba 3:

- Tiempo hasta ignición: 0:01:00
- Tiempo de ignición: 0:00:36
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 3.01 cm/min

Prueba 4:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:45
- Tiempo de ignición: 0:00:15
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 4.0 cm/min

Aglomerado MDF

Prueba 1:

- Tiempo hasta ignición: 0:01:00
- Tiempo de ignición: 0:00:24
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 4.14 cm/min

Prueba 2:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:44
- Tiempo de ignición: 0:00:16
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 3.65 cm/min

Prueba de ignición por Resistencia eléctrica y mecha de combustible

Aglomerado X

Prueba 1:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:38
- Tiempo de ignición: 0:00:05
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 5.14 cm/min

Prueba 2:

- Tiempo hasta ignición: 0:02:22
- Tiempo de ignición: 0:01:42
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 18.02 cm/min

Prueba 3:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:55
- Tiempo de ignición: 0:00:20
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 8.75 cm/min

Aglomerado MDF

Prueba 1:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:41
- Tiempo de ignición: 0:00:11
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 3.02 cm/min

Prueba 2:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:32
- Tiempo de ignición: 0:00:08
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 3.57 cm/min

Prueba de ignición con un quemador de gas

Aglomerado X

Prueba 1:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:15
- Tiempo de ignición: 0:00:10
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 3.62 cm/min

Prueba 2:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:15
- Tiempo de ignición: 0:00:10
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 4.24 cm/min

Prueba 3:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:25
- Tiempo de ignición: 0:00:05
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 3.86 cm/min

Aglomerado MDF

Prueba 1:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:15
- Tiempo de ignición: 0:00:10
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 4.85 cm/min

Prueba 2:

- Tiempo hasta ignición: 0:00:20
- Tiempo de ignición: 0:00:10
- Velocidad de propagación de la llama promedio: 3.50 cm/min

APÉNDICE B
Cálculos

Velocidad en el interior de la cámara de pruebas

Se conoce: Número de Reynolds Re , en régimen laminar y diámetro de la cámara de pruebas $d_{cilindro}$.

Suposiciones:

- Número de Reynolds crítico constante de 2300 para flujo laminar.
- Propiedades dependientes a los cambios de temperatura en el interior de la cámara de pruebas.

Propiedades: Tabla A.4 libro Incropera 4ta Edición, aire @ T_{emp} : μ, ρ

Análisis:

Para obtener la velocidad media dentro de la cámara de pruebas, se fija un número de Reynolds crítico constante de 2300, para flujo laminar, de esta manera se determina la velocidad media (v_{media}) dentro de la cámara.

$$Re = \frac{\rho V_{media} d}{\mu} \text{ (Ecuación B.1)}$$

Las propiedades del aire varían a lo largo de la cámara de pruebas a una temperatura T_{emp} .

Tabla B.3 Resultados obtenidos de Velocidad para temperatura variable en el interior de la cámara de pruebas

	T_{emp} [C]	ρ [kg/m ³]	μ [kg/m-s]	V_{media} [m/s]
Run 1	25	1,184	0,00001849	0,1497
Run 2	38,01	1,134	0,00001909	0,1613
Run 3	51,01	1,089	0,00001968	0,1732
Run 4	64,02	1,047	0,00002026	0,1855
Run 5	77,03	1,008	0,00002083	0,1981
Run 6	90,03	0,9718	0,00002139	0,2109
Run 7	103	0,9382	0,00002194	0,2241
Run 8	116	0,9068	0,00002248	0,2375
Run 9	129,1	0,8775	0,00002301	0,2513
Run 10	142,1	0,85	0,00002353	0,2653

Fuente: Elaboración propia

Espesor de capa limite hidrodinámica

Se conoce: Número de Reynolds en régimen laminar, longitud de entrada y longitud de la cámara de pruebas

Esquema:

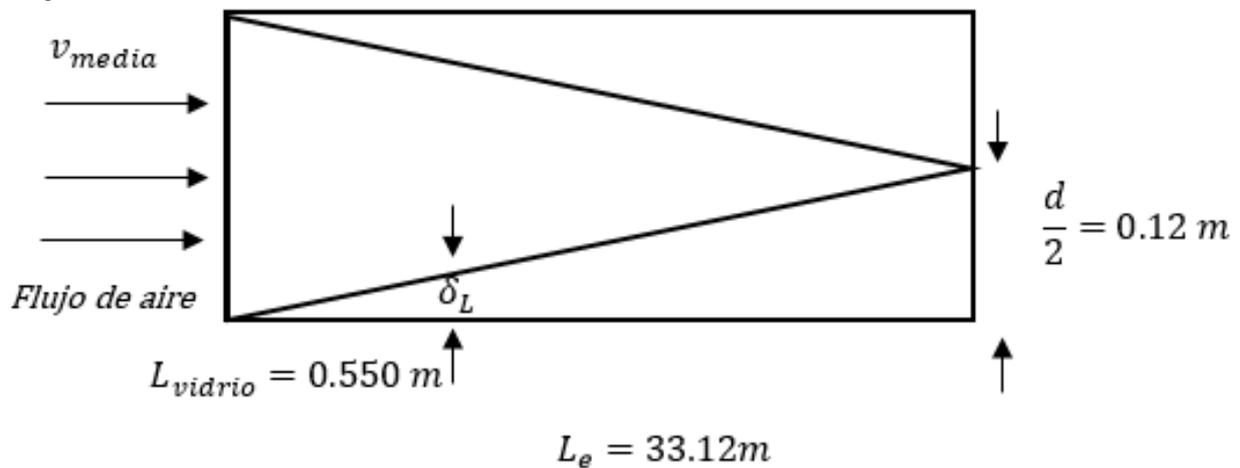


Figura B.1 Esquema de la capa límite hidrodinámica de la cámara de pruebas

Fuente: Elaboración propia

Suposiciones:

- Número de Reynolds crítico constante de 2300 para flujo laminar.
- Se asume una relación lineal entre la longitud de entrada y el espesor de la capa límite hidrodinámica

Análisis:

Para determinar el espesor de la capa límite hidrodinámica, se parte de la ecuación:

$$L_e = 0.06 R_e d \text{ (Ecuación B.2)}$$

$$\delta_H = \frac{L_{vidrio}}{0.1 R_e} \text{ (Ecuación B.3)}$$

$$\delta_H = 1.993 \text{ mm}$$

Tal que:

δ_H = Espesor de capa límite hidrodinámica

L_{vidrio} = Longitud total del ducto de vidrio

Espesor de capa límite térmica

Se conoce: La longitud de la muestra a ensayar y la velocidad del flujo sobre la superficie

Esquema:

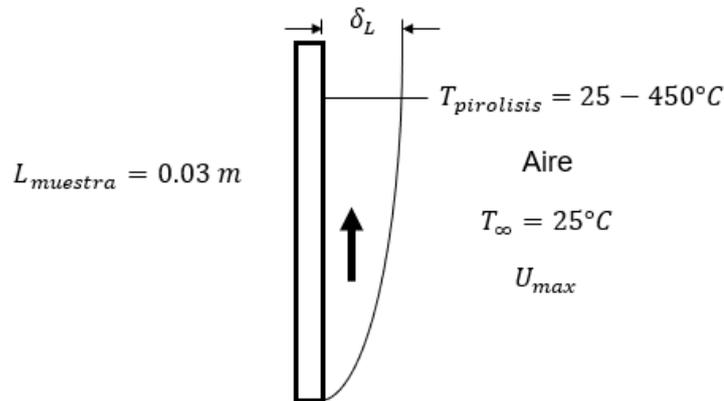


Figura B.2 Esquema de la capa límite térmica en la muestra

Fuente: Elaboración propia

Suposiciones:

- Espesor de la capa límite térmica generado por la transferencia de calor en convección forzada para una placa plana vertical.
- Propiedades dependientes a los cambios de temperatura en el interior de la cámara de pruebas.
- Efectos de empuje insignificantes cuando $U_{max} < 0.5322 \text{ m/s}$

Propiedades: Tabla A.4 libro Incropera 4ta Edición, aire ($T_f = \frac{T_\infty + T_{pirolisis}}{2}$): ν_{air}

Análisis:

Para una placa plana vertical, el espesor de la capa límite es el siguiente:

$$\delta_L = \frac{5L_{muestra}}{Re_L^{1/2}} \quad (7.19 \text{ Incropera 4ta Edición}) \quad (\text{Ecuación B.4})$$

Tal que:

δ_L = Espesor de capa límite generado en la superficie de la muestra

Re_L = Número de Reynolds alrededor de la muestra

$L_{muestra}$ = Longitud de la muestra

Para determinar el espesor, primero se debe determinar el número de Reynolds a los alrededores de la muestra.

$$Re_L = \frac{U_{max} L_{muestra}}{\nu_{air}} \text{ (Ecuación B.5)}$$

Donde:

ν_{air} = Viscosidad cinemática del aire

U_{max} = Velocidad máxima del flujo de aire entrante

Los resultados se muestran a continuación en la siguiente Tabla B.2

Tabla B.4 Resultados obtenidos del espesor de capa límite térmica

	$T_{pirolisis}$ [C]	U_{max} [m/s]	ν_{air} [m ² /s]	Re_L	δ_L [m]
Run 1	25	0,2993	0,00001562	5750	0,01978
Run 2	72,22	0,3227	0,00001784	5426	0,02036
Run 3	119,4	0,3468	0,00002018	5156	0,02089
Run 4	166,7	0,3714	0,00002262	4927	0,02137
Run 5	213,9	0,3967	0,00002516	4731	0,02181
Run 6	261,1	0,4227	0,0000278	4561	0,02221
Run 7	308,3	0,4492	0,00003053	4413	0,02258
Run 8	355,6	0,4763	0,00003336	4283	0,02292
Run 9	402,8	0,504	0,00003628	4168	0,02324
Run 10	450	0,5322	0,00003928	4065	0,02353

Fuente: Elaboración propia

Espacio libre para ensayo de muestra

Al tener los espesores de capa límite, tanto hidrodinámico como térmico, se procede a calcular el espacio libre para la colocación de la muestra. En esta sección el flujo representa propiedades no viscosas. Se muestran los resultados en la Tabla B.3

$$e_{libre} = d - 2\delta_H - \delta_L \text{ (Ecuación B.6)}$$

Tabla B.5 Resultados obtenidos del espacio libre para la colocación de la muestra

	δ_H [m]	δ_L [m]	E_{libre} [m]
Run 1	0,001993	0,01978	0,08823
Run 2	0,001993	0,02036	0,08764
Run 3	0,001993	0,02089	0,08712
Run 4	0,001993	0,02137	0,08664
Run 5	0,001993	0,02181	0,0862
Run 6	0,001993	0,02221	0,0858
Run 7	0,001993	0,02258	0,08543
Run 8	0,001993	0,02292	0,08509
Run 9	0,001993	0,02324	0,08477
Run 10	0,001993	0,02353	0,08448

Fuente: Elaboración propia

Pérdidas de presión en ducto circular (cámara de pruebas)

Se conoce: Número de Reynolds en el régimen laminar, diámetro de la cámara de pruebas, longitud total del desarrollo del flujo

Esquema:

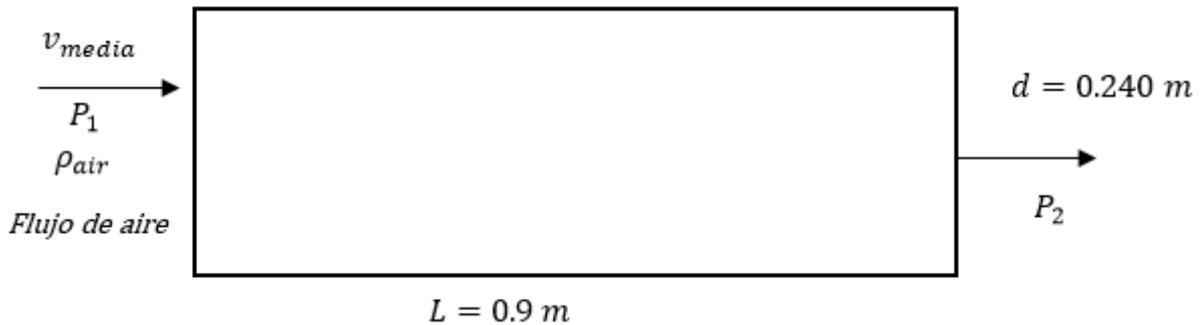


Figura B.3 Cámara de pruebas, presión entrada y salida

Fuente: Elaboración propia

Suposiciones:

- Número de Reynolds crítico constante de 2300 para flujo laminar
- Propiedades dependientes a los cambios de temperatura en el interior de la cámara de pruebas.
- Presión atmosférica a la entrada del ducto (P_1)

Propiedades: Tabla A.4 libro Incropera 4ta Edición aire @ $T_m = \frac{T_\infty + T_s}{2}$; ρ_{airc}

Análisis:

Para un ducto circular, la pérdida de presión es la siguiente:

$$\Delta P_{camara} = \frac{K_{camara} \rho_{aire} v_{media}^2}{2} \text{ (Ecuación B.7)}$$

Tal que:

ΔP_{camara} = Es la pérdida de presión a lo largo de la cámara de pruebas

K_{camara} = Es el coeficiente de fricción a lo largo de la cámara de pruebas

Para determinar el valor de K_{camara} :

$$K_{camara} = \frac{fL}{d} \text{ (Ecuación B.8)}$$

Siendo f el factor de fricción adimensional, para flujo laminar

$$f = \frac{64}{Re} \text{ (Ecuación B.9)}$$

Donde:

L= Es la longitud total del desarrollo del flujo

Los resultados se muestran a continuación en la Tabla B.4.

Tabla B.6 Resultados de las pérdidas de presión dentro de la cámara de pruebas

	T_{media} [C]	ρ_{aire} [kg/m ³]	f	K_{camara}	ΔP_{camara} [kg/m-s ²]
Run 1	110,7	0,9194	0,02783	0,1043	0,001075
Run 2	110,7	0,9194	0,02783	0,1043	0,001493
Run 3	110,7	0,9194	0,02783	0,1043	0,002012
Run 4	110,7	0,9194	0,02783	0,1043	0,002643
Run 5	110,7	0,9194	0,02783	0,1043	0,003397

Fuente: Elaboración propia

Pérdidas de presión en el dispositivo reductor de velocidad (Honeycomb)

Se conoce: Espesor del direccionador de flujo, diámetro hidráulico, temperatura ambiente.

Suposiciones:

- Gas ideal
- Propiedades constantes
- Numero de Reynolds crítico constante de 2300 para flujo laminar
- Se considera temperatura ambiente para el cálculo de la velocidad media, antes de ingresar al ducto de la cámara de pruebas.

Análisis:

Se determina un coeficiente de fricción dado de la siguiente manera:

$$K_{hon} = \lambda_{hon} \left[\frac{L_h}{D_h} + 3 \right] \left[\frac{1}{\beta_{hon}} \right]^2 + \left[\frac{1}{\beta_{hon}-1} \right]^2 \text{ (Ecuación B.10)}$$

Tal que:

L_h =Espesor del direccionador de flujo (60 mm)

D_h = Diámetro hidráulico de una celda del direccionador de flujo (9.5 mm)

β_{hon} = Porosidad, (usando la ecuación 2.7) (Rangos usuales de 0.5 a 0.9)

Para determinar el valor de λ_{hon} :

$$\lambda_{hon} = 0.214 \left[\frac{\epsilon_{plast}}{D_h} \right]^{0.4}, \text{ para Reynolds} > 275 \text{ (Ecuación B.11)}$$

Donde:

λ_{hon} = Coeficiente dependiente del Número de Reynolds

$$\epsilon_{plast} = 0.0015 \text{ mm}$$

Por lo tanto, para el cálculo de la caída de presión en el honeycomb:

$$\Delta P_{hon} = \frac{K_{hon} \rho_{air} V_{media}^2}{2} \text{ (Ecuación B.12)}$$

Se muestran los resultados en la Tabla B.5.

Tabla B.7 Resultados de la pérdida de presión debido al honeycomb

	ρ_{air} [kg/m ³]	λ_{hon}	K_{hon}	ΔP_{hon} [kg/m-s ²]
Run 1	1,184	0,006453	0,1564	0,002074
Run 2	1,005	0,006453	0,1564	0,002446
Run 3	0,8727	0,006453	0,1564	0,002863
Run 4	0,7714	0,006453	0,1564	0,003324
Run 5	0,6911	0,006453	0,1564	0,003828

Fuente: Elaboración propia

Pérdidas de presión en la malla protectora (Malla 1 y Malla 2)

Se conoce: Diámetro del espaciado del mallado, velocidad media

Suposiciones:

- Gas ideal
- Propiedades constantes
- Numero de Reynolds crítico constante de 2300 para flujo laminar
- Se considera temperatura ambiente para el cálculo de la velocidad media, antes de ingresar al ducto de la cámara de pruebas.

Propiedades: Tabla A.4 libro Incropera 4ta Edición aire @ $T_{\infty}, \mu_d, \rho_d$

Análisis:

Se determina un coeficiente de fricción dado de la siguiente manera:

$$K_{malla2} = 0.52 \left[\frac{1-\beta_{malla}^2}{\beta_{malla}^2} \right] \text{ (Ecuación B.13)}$$

$$K_{malla1} = \frac{1-0.95\beta_{malla}^2}{0.95\beta_{malla}} + \frac{55.2}{Re_d} \text{ (Ecuación B.14)}$$

Tal que:

K_{malla2} = Coeficiente de fricción de la malla protectora del honeycomb (malla ubicada después del honeycomb)

K_{malla1} = Coeficiente de fricción de la malla protectora del honeycomb (malla ubicada antes del honeycomb)

β_{malla} = Porosidad de malla protectora (usando la ecuación 2.7)

Re_d = Número de Reynolds basado en el D_{in} de los agujeros

Para determinar el valor de Re_d :

$$Re_d = \frac{\rho_d V_{media} d_d}{\mu_d} \text{ (Ecuación B.15)}$$

Donde:

d_d = Diámetro espaciado del mallado (3 mm)

μ_d = Viscosidad dinámica

Por lo tanto, para determinar ΔP_{malla1} y ΔP_{malla2} esta dado de la siguiente manera:

$$\Delta P_{malla1} = \frac{K_{malla1} \rho_d V_{media}^2}{2} \text{ (Ecuación B.16)}$$

$$\Delta P_{malla2} = \frac{K_{malla2} \rho_d V_{media}^2}{2} \text{ (Ecuación B.17)}$$

A continuación, se muestran los resultados en la Tabla B.6

Tabla B.8 Resultados de la pérdida de presión debido a las mallas protectoras

	ρ_d [kg/m ³]	μ_d [kg/m-s]	β_{malla}	K_{malla1}	ΔP_{malla1} [kg/m-s ²]	K_{malla2}	ΔP_{malla2} [kg/m-s ²]
Run 1	1,184	0,00001849	0,6	3,873	0,05135	0,9244	0,01226

Fuente: Elaboración propia

Temperatura del aire a la salida de la cámara de pruebas

Se conoce: Poder calorífico o calor de combustión del material de prueba ΔH , la pérdida de masa durante la combustión \dot{m}_f , dimensiones de la cámara de pruebas L_{vidrio} y d

Esquema:

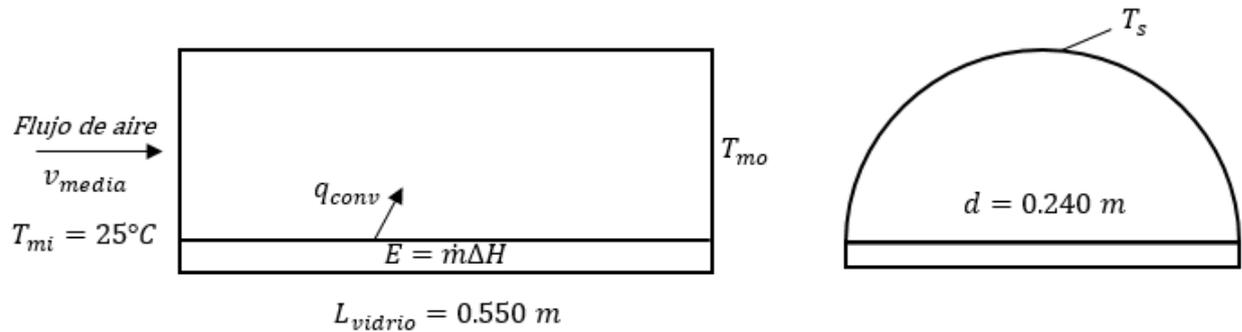


Figura B.4 Transferencia de calor por flujo interno en ductos a temperatura constante.

Fuente: Elaboración propia

Suposiciones:

- Todo el calor emitido por la muestra es liberado a través de calor por convección hacia el flujo de aire.
- Para el análisis de la transferencia de calor, se utiliza flujo interno en ductos a temperatura superficial constante.
- Se asume que el calor liberado por la muestra sólo se transmite hacia la mitad del ducto, se desprecia las pérdidas de calor por la parte posterior de la muestra ya que se asume que ésta se encuentra completamente aislada a través de sus demás caras.
- El área que libera toda la energía generada producto de la combustión está definida como una de las caras de la muestra.
- La temperatura superficial del ducto se considera constante a lo largo del ducto.

Propiedades: Tabla A.4 libro Incropera 4ta Edición, aire ($T_m = \frac{T_{mo} + T_{mi}}{2}$): C_p, ρ_{air}

Análisis:

Para calcular la temperatura del aire a la salida del ducto, se asume que todo el calor generado es igual al calor por convección ganado por el aire:

$$E = q_{conv} \quad (\text{Ecuación B.18})$$

Por otro lado, se conoce además que el calor generado por la combustión está sujeto a la siguiente ecuación:

$$E = \dot{m}_f \Delta H A_s \text{ (Ecuación B.19)}$$

En donde:

E = Es el calor liberado (kW)

ΔH = Es el calor de combustión o poder calorífico (kJ/kg)

\dot{m}_f = Pérdida de masa durante la combustión de la muestra [kg/s]

A_s = Área en transferencia de calor, superficie frontal de la muestra. [m²]

De acuerdo a pruebas realizadas anteriormente, en materiales como el PMMA se obtuvo que la tasa de pérdida de masa durante la combustión es $\dot{m}_f = 0.02735 \left[\frac{kg}{s} \right]$. El poder calorífico del PMMA es $\Delta H = 26.56 \left[\frac{kJ}{g} \right]$ y en función a estos resultados se procede a calcular la temperatura del aire a la salida de la cámara. (DiNenno & Walton, 2002)

Puesto que el calor por convección es igual a:

$$q_{conv} = \dot{m} C_p (T_{mo} - T_{mi}) \text{ (Ecuación B.20)}$$

En donde:

q_{conv} = Flujo de calor liberado por convección

\dot{m} = Es el flujo másico del aire

C_p = Calor específico del aire

T_{mo} = Temperatura del aire a la salida del ducto

T_{mi} = Temperatura del aire a la entrada del ducto

Finalmente, igualando ambas ecuaciones se obtiene:

$$\dot{m}_f \Delta H A_s = \dot{m} C_p (T_{mo} - T_{mi}) \text{ (Ecuación B.21)}$$

$$T_{mo} = 142.06^\circ C$$

Comentarios: A través de este análisis se obtiene la máxima temperatura que el aire podría alcanzar a la salida del ducto.

Temperatura superficial de la cámara de pruebas

Se conoce: Calor generado durante el proceso de combustión E , el flujo másico de aire en el interior del ducto \dot{m}_{air} , diámetro interior y exterior del ducto, la temperatura del aire a la entrada y salida del ducto T_{mi} y T_{mo} , respectivamente.

Esquema:

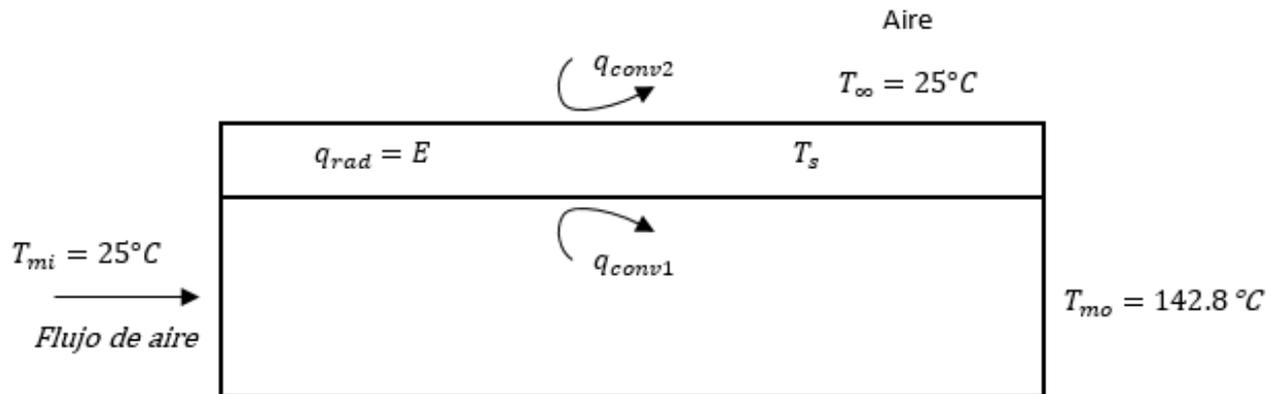


Figura B.5 Esquema de liberación de calor por convección y radiación

Fuente: Elaboración propia

Suposiciones:

- Todo el calor generado por la muestra en combustión es recibido a través de radiación a la mitad del ducto que conforma la cámara de pruebas.
- El calor recibido es liberado a través de convección forzada al interior del ducto y por medio de convección libre al exterior del mismo.
- Se asume transferencia de calor para placas verticales para el análisis de transferencia de calor por convección natural para cilindros verticales siempre que se cumpla que $\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr^{1/4}}$
- Se asume que la temperatura del aire a la salida del ducto es la máxima, es decir, T_{mo} igual a $142.06^\circ C$

Propiedades: Tabla A.4 libro Incropera 4ta Edición, flujo de aire @ $T_m = \frac{T_{mo} + T_{mi}}{2}$; C_p ; aire al exterior de la cámara @ $T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$; k_{out} , β , ν_{out} , α , Pr

Análisis:

Se realiza un balance de energía considerando que la energía contenida en la cámara es liberada a través de convección forzada y libre a sus alrededores.

$$E = q_{rad} \quad (\text{Ecuación B.22})$$

$$q_{rad} = q_{conv1} + q_{conv2} \quad (\text{Ecuación B.23})$$

En donde:

q_{conv1} = Calor por convección forzada al interior del ducto.

q_{conv2} = Calor por convección libre hacia la atmosfera.

Se da un valor inicial a la temperatura en la superficie del ducto T_s , hasta que el valor converja a la respuesta. Con este valor inicial, se calcula los coeficientes convectivos h_1 (coeficiente convectivo en el interior del ducto) y h_2 (coeficiente convectivo hacia la atmósfera).

Para determinar h_1 se conoce:

$$h_1 = \frac{\dot{m}_{air} C_p (T_{mo} - T_{mi})}{A_1 \Delta T_{lm}} \quad (\text{Ecuación B.24})$$

En donde:

A_1 = Área en transferencia de calor al interior del ducto

ΔT_{lm} = Delta de temperatura media logarítmica.

Para determinar ΔT_{lm} se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln\left(\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i}\right)} \quad (\text{Ecuación B.25})$$

Donde se expresan:

$$\Delta T_o = T_s - T_{mo} \quad (\text{Ecuación B.26})$$

$$\Delta T_i = T_s - T_{mi} \quad (\text{Ecuación B.27})$$

Para determinar h_2 se conoce:

$$h_2 = \frac{k_{out} N_{uDout}}{D_h} \quad (\text{Ecuación B.28})$$

Tal que,

k_{out} = Coeficiente de conductividad térmica en el exterior del ducto.

N_{uDout} = Número de Nusselt en el exterior del ducto.

D_h = Diámetro hidráulico para un semicírculo.

En función a la geometría de análisis, se calcula el diámetro hidráulico para un semicírculo.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (\text{Ecuación B.29})$$

En donde:

A = Área de la sección transversal.

P = Perímetro del área mojada.

Para determinar el número de Nusselt, se debe verificar en primer lugar que se cumpla con la correlación $\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr^{1/4}}$ para hacer uso de la siguiente ecuación para transferencia de calor en convección natural para placas planas verticales.

$$Nu_{Dout} = 0.68 + \frac{0.67R_{aL}^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} \quad (\text{Ecuación B.30})$$

Tal que,

Pr = Número de Prandtl, evaluado a temperatura T_f

R_{aL} = Número de Rayleigh

El número de Rayleigh se obtiene de:

$$R_{aL} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_{vidrio}^3}{\nu_{out}\alpha} \quad (\text{Ecuación B.31})$$

Tal que,

g = aceleración de la gravedad

β = Coeficiente de expansión

T_∞ = Temperatura ambiente al exterior del ducto

L_{vidrio} = Longitud del vidrio

α = Difusividad térmica

ν_{out} = Viscosidad dinámica, evaluada a temperatura T_f

Haciendo uso del software de resolución EES se obtuvo una temperatura en la superficie del vidrio de $T_s = 196.43^\circ\text{C}$.

Los resultados generales obtenidos del programa EES, se muestran a continuación:

$A = 0.02338 \text{ [m}^2\text{]}$	$\alpha = 0.00003158 \text{ [m}^2\text{/s]}$	$A_{in} = 0.2108 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{out} = 0.2194 \text{ [m}^2\text{]}$
$A_s = 0.036 \text{ [m}^2\text{]}$	$\beta = 0.00274 \text{ [1/K]}$	$C_p = 1.009 \text{ [kJ/kg-K]}$	$\Delta H = 26.56 \text{ [kJ/g]}$
$\Delta T_i = 133.8 \text{ [C]}$	$\Delta T_o = 16.74 \text{ [C]}$	$d_{ancho} = 0.12 \text{ [m]}$	$d_{cil} = 0.244 \text{ [m]}$
$D_h = 0.1491 \text{ [m]}$	$d_{out} = 0.254 \text{ [m]}$	$E = 20.18 \text{ [kJ/s-m}^2\text{]}$	$E_1 = 0.7264 \text{ [kJ/s]}$
$e_{vidrio} = 0.005 \text{ [m]}$	$g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$h_{convin} = 0.3583 \text{ [W/m}^2\text{-K]}$	$h_{convout} = 19.2 \text{ [W/m}^2\text{-K]}$
$k_{out} = 0.03038 \text{ [W/m-K]}$	$L_{placa} = 0.3 \text{ [m]}$	$L_{vidrio} = 0.55 \text{ [m]}$	$\mu_{out} = 0.00002147 \text{ [kg/m-s]}$
$\dot{m} = 0.7597 \text{ [g/s-m}^2\text{]}$	$\dot{m}_{air} = 0.006153 \text{ [kg/s]}$	$m_{loss} = 0.02735 \text{ [g/s]}$	$v_{out} = 0.0000222 \text{ [m}^2\text{/s]}$
$Nu_{Dout} = 94.24$	$P = 0.6273 \text{ [m]}$	$Pr = 0.7134$	$P_{atm} = 101.3 \text{ [kPa]}$
$q_{conv} = 726.4 \text{ [J/s]}$	$q_{conv1} = 4.106 \text{ [W]}$	$q_{conv2} = 722.3 \text{ [W]}$	$Ra_L = 1.093E+09$
$\rho_{air} = 0.9893 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho_{out} = 0.9668 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$T_f = 91.9 \text{ [C]}$	$T_{ff} = 364.9 \text{ [K]}$
$T_\infty = 25 \text{ [C]}$	$T_m = 83.58 \text{ [C]}$	$T_{mi} = 25 \text{ [C]}$	$T_{mo} = 142.06 \text{ [C]}$
$T_{mo1} = 142.16 \text{ [C]}$	$T_s = 196.43 \text{ [C]}$	$T_{s1} = 158.800 \text{ [C]}$	$V_{media} = 0.266 \text{ [m/s]}$

Figura B.6 Resultados generales obtenidos del programa EES.

Fuente: Elaboración propia

APÉNDICE C

Pasos a seguir para realizar la simulación

A continuación, se muestran los pasos a seguir para dar inicio con la simulación.

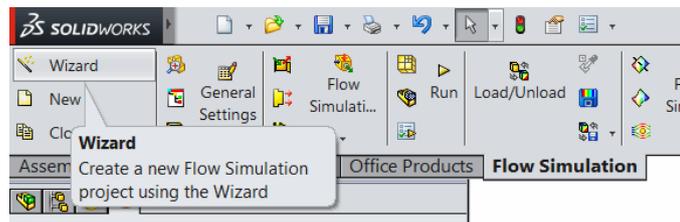


Figura D.1 Inicio a la ventana de configuración

Fuente: Elaboración propia

Para dar inicio a la ventana de configuraciones y parámetros generales, se debe seleccionar la opción que se muestra en la Figura D.1. La ventana de configuración se encuentra dividida en 8 secciones, y se muestran a continuación.

1. Configuración general:

- Nombre del proyecto: Simulación flujo controlado
- Configuración estándar del programa

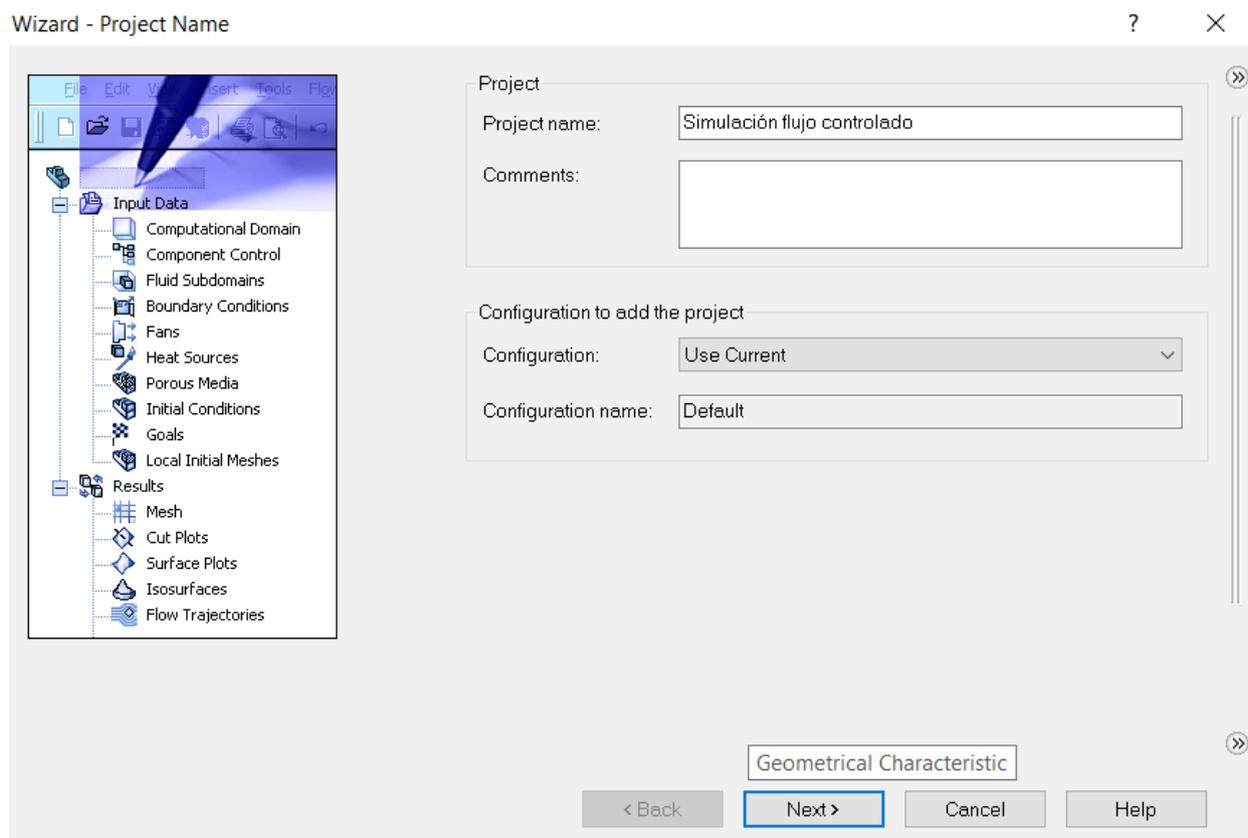


Figura D.2 Ventana inicial, nombres y comentarios del proyecto

Fuente: Elaboración propia

2. Sistema de unidades:

- Se procede a elegir el sistema de unidades deseado, además es posible personalizar y cambiar la unidad de cada parámetro por separado.

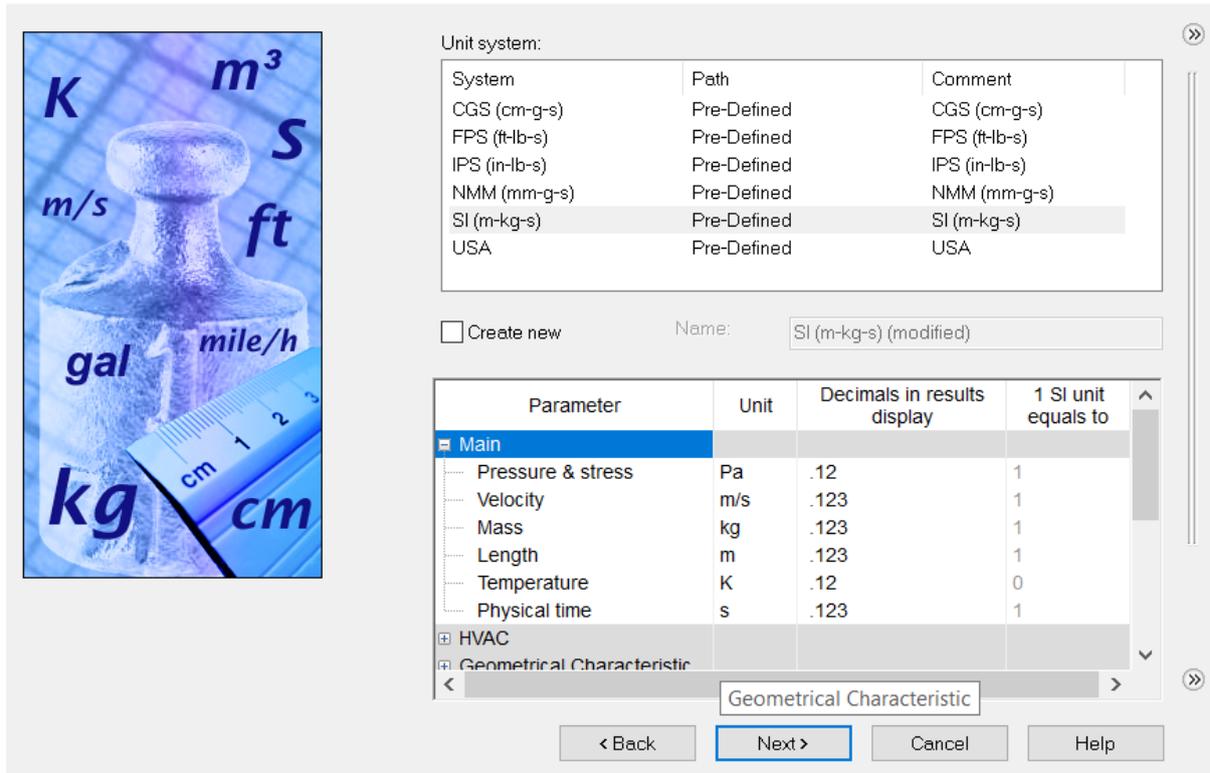


Figura D.3 Ventana del sistema de unidades

Fuente: Elaboración propia

3. Tipo de análisis:

- Permite elegir entre realizar un análisis de flujo externo o flujo interno, para este caso se decide realizar un análisis de flujo interno.
- Al seleccionar un análisis por rotación, se debe especificar el eje de rotación, en este caso se utiliza la componente Z
- De igual manera para seleccionar el eje de rotación, se debe seleccionar la dirección de la velocidad de aceleración de la gravedad, en este caso se encuentra en la dirección del eje Z
- Análisis de calor por conducción en sólidos

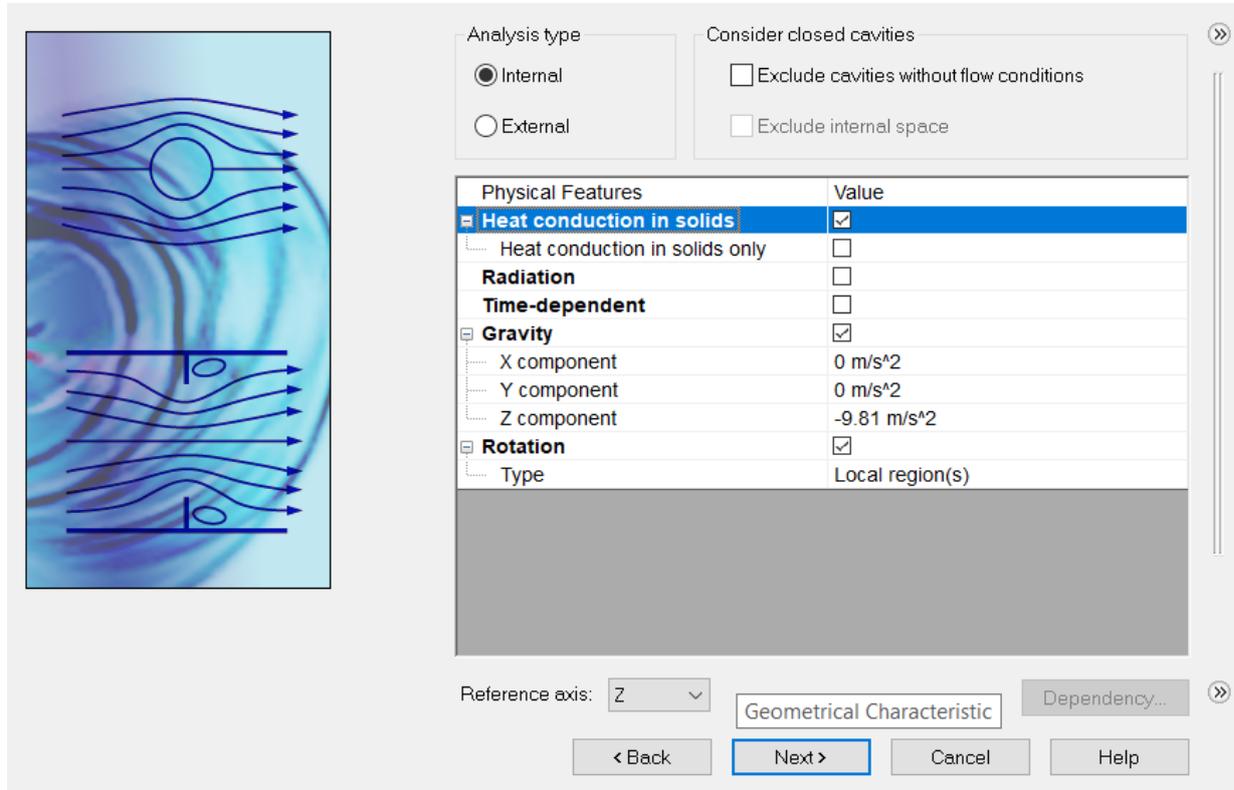


Figura D.4 Ventana para seleccionar el tipo de análisis

Fuente: Elaboración propia

4. Selección de fluidos

- Permite seleccionar entre fluidos gaseosos y líquidos, para este caso se elige como fluido aire (Gas ideal)
- Tipo de flujo: laminar y turbulento

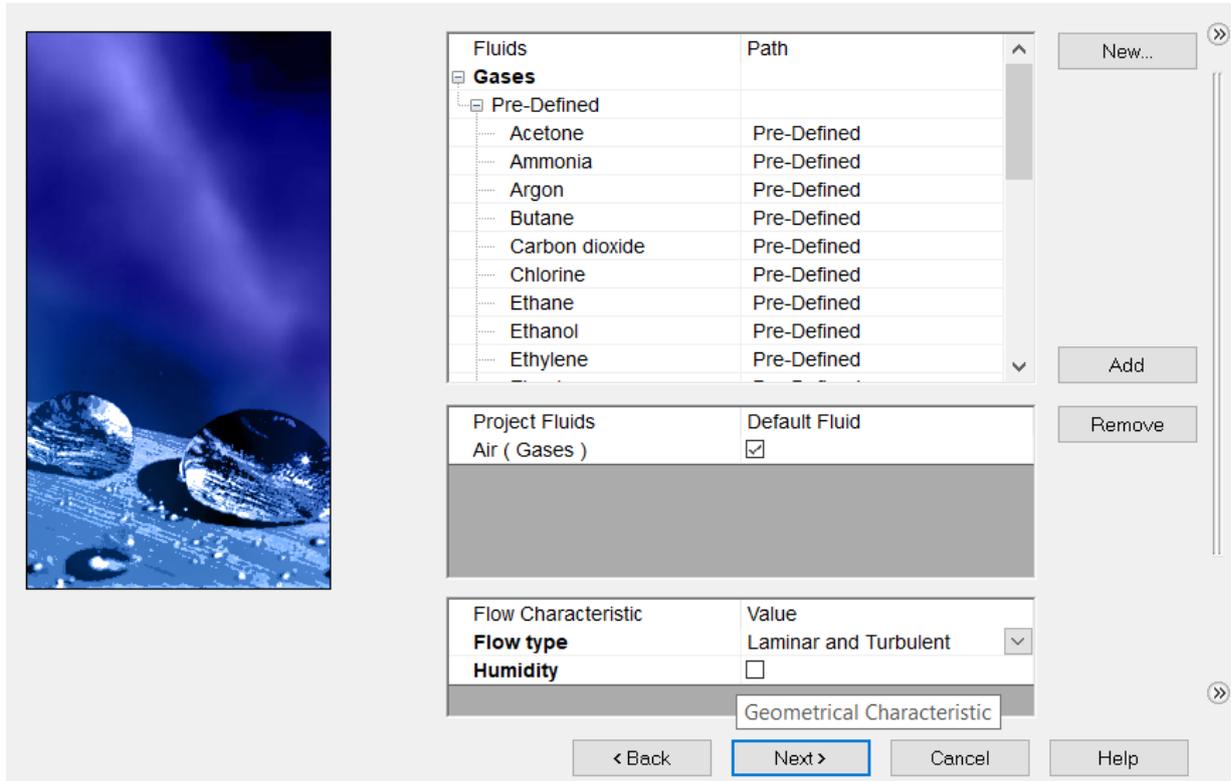


Figura D.5 Ventana de selección del fluido de trabajo

Fuente: Elaboración propia

5. Selección de material sólido

- Selección del material de la muestra de prueba, en caso de no encontrarse con el material deseado, es posible agregar un material nuevo con las especificaciones deseadas.

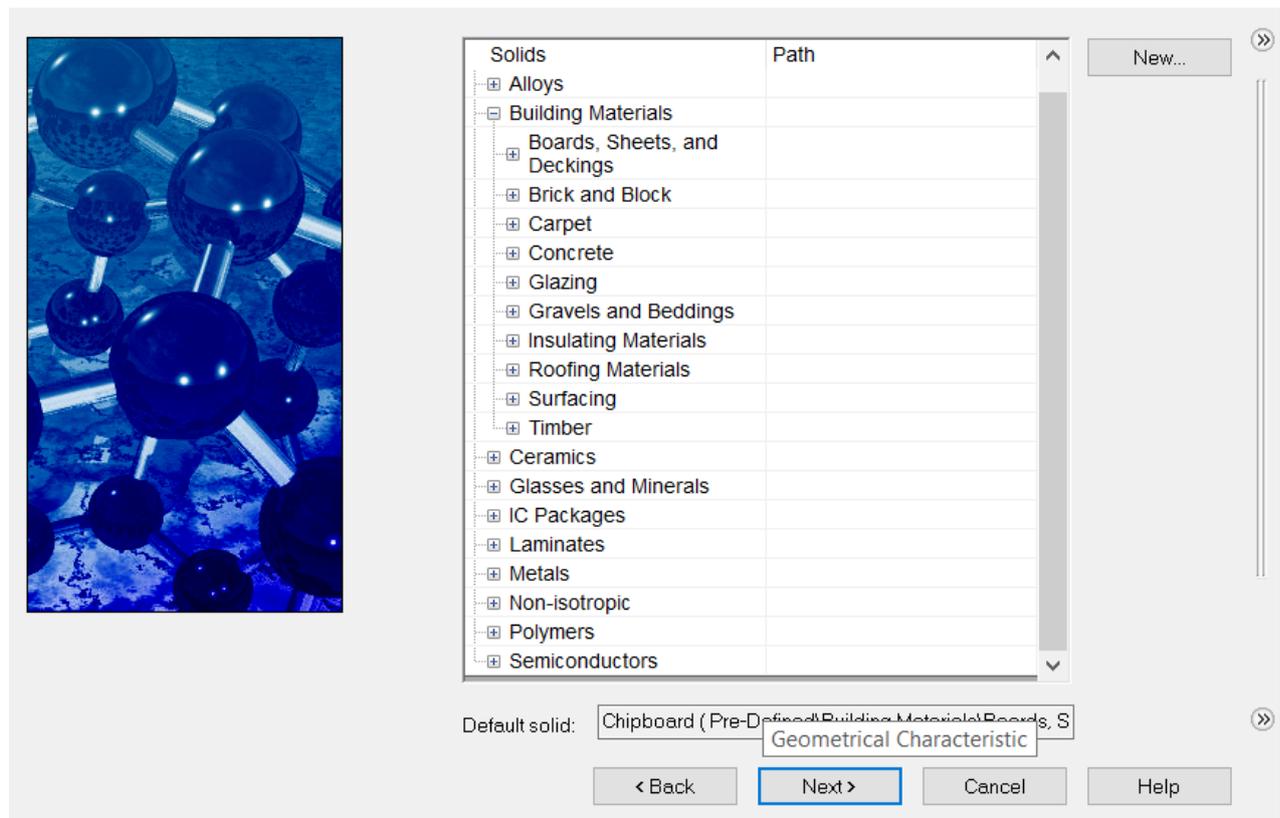


Figura D.6 Ventana de selección del sólido de trabajo

Fuente: Elaboración propia

6. Condiciones externas

- Para este caso se selecciona la opción de temperatura ambiente en el exterior de la cámara de pruebas.

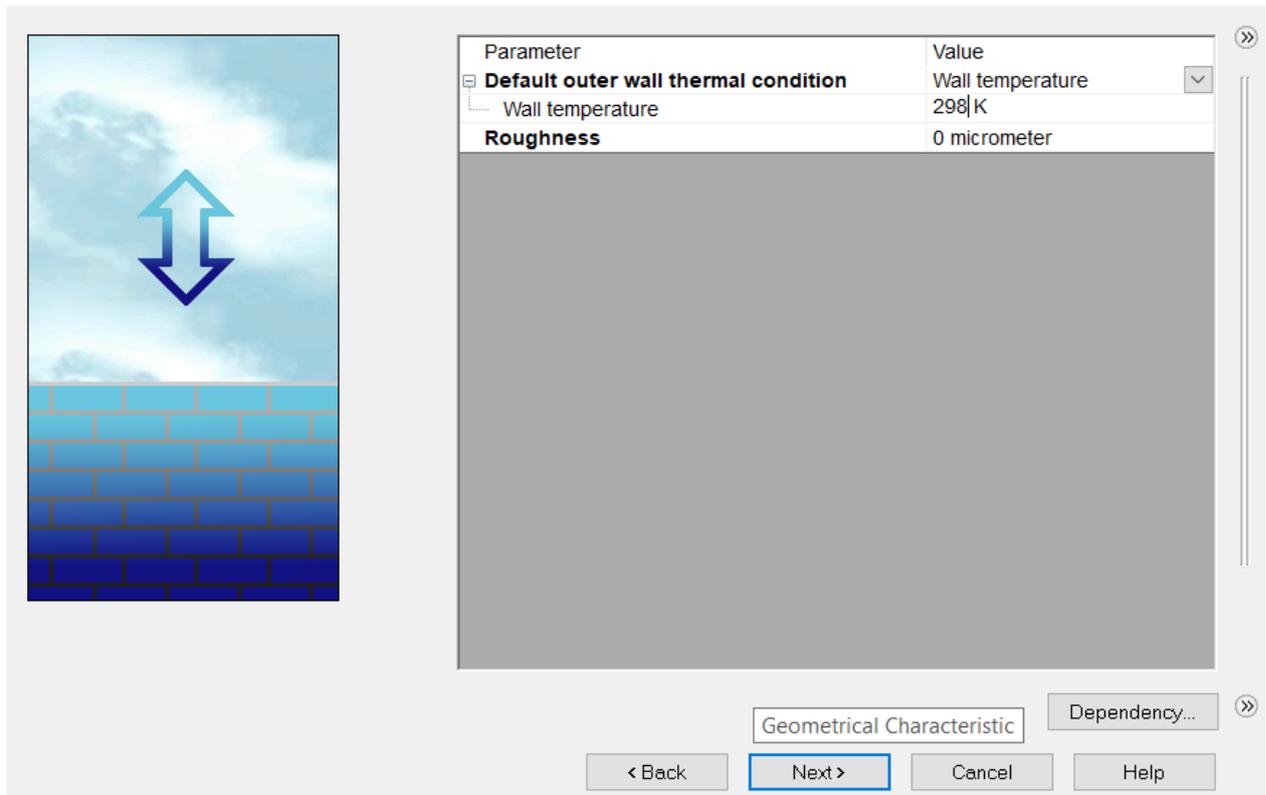
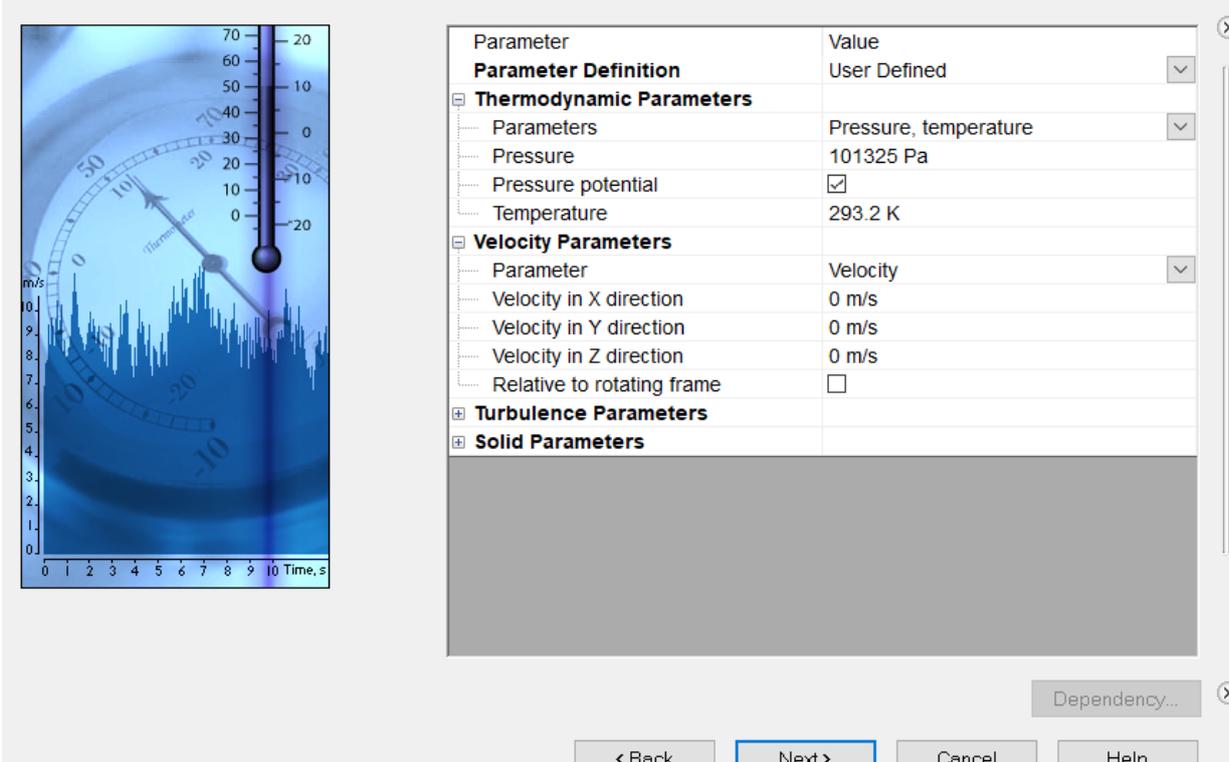


Figura D.7 Condiciones externas de pared

Fuente: Elaboración propia

7. Condiciones iniciales:

- En este caso es conveniente utilizar las condiciones iniciales propuestas por el programa, para luego introducir los parámetros deseados, tales como la velocidad de giro del ventilador, las condiciones de frontera y la fuente de generación de calor.



Parameter	Value
Parameter Definition	User Defined
Thermodynamic Parameters	
Parameters	Pressure, temperature
Pressure	101325 Pa
Pressure potential	<input checked="" type="checkbox"/>
Temperature	293.2 K
Velocity Parameters	
Parameter	Velocity
Velocity in X direction	0 m/s
Velocity in Y direction	0 m/s
Velocity in Z direction	0 m/s
Relative to rotating frame	<input type="checkbox"/>
Turbulence Parameters	
Solid Parameters	

Dependency...

< Back Next > Cancel Help

Figura D.8 Condiciones iniciales

Fuente: Elaboración propia

8. Calidad y resolución del mallado

- Con una resolución intermedia es suficiente para el propósito de la simulación. Para mayor precisión, se recomienda utilizar la escala de resolución 8.

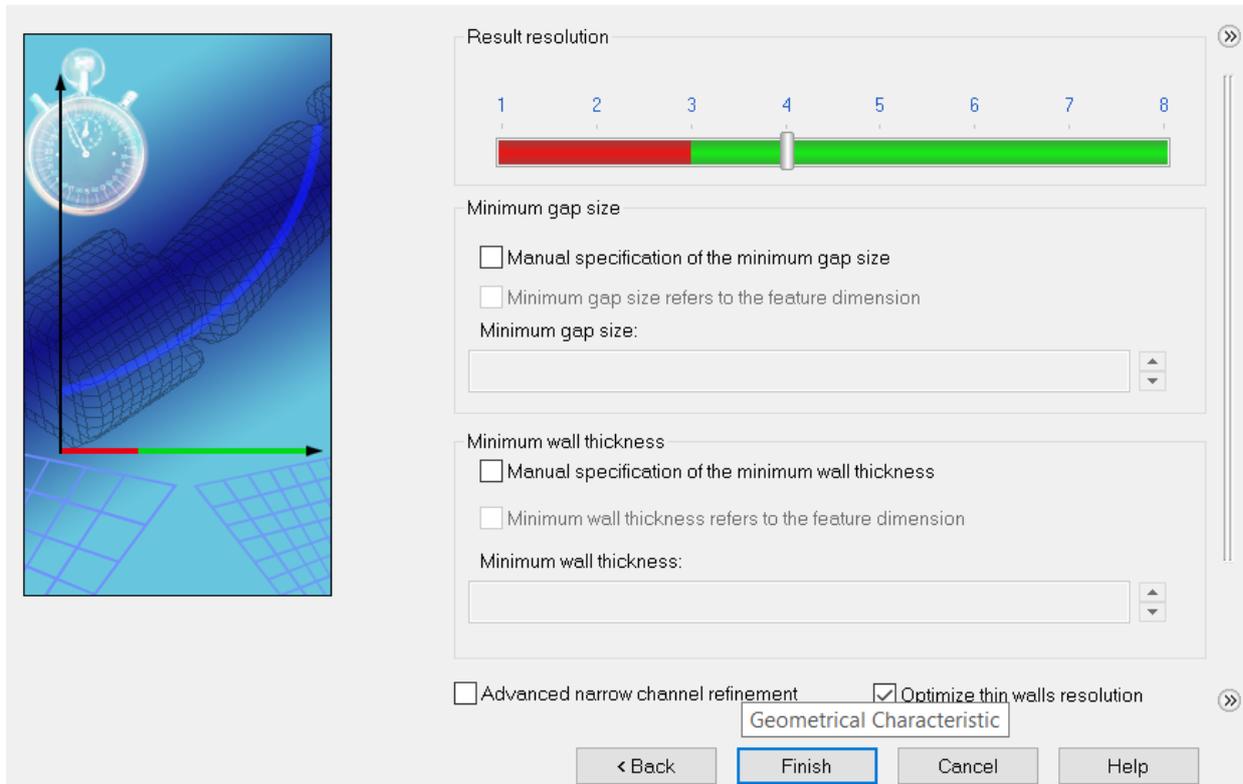
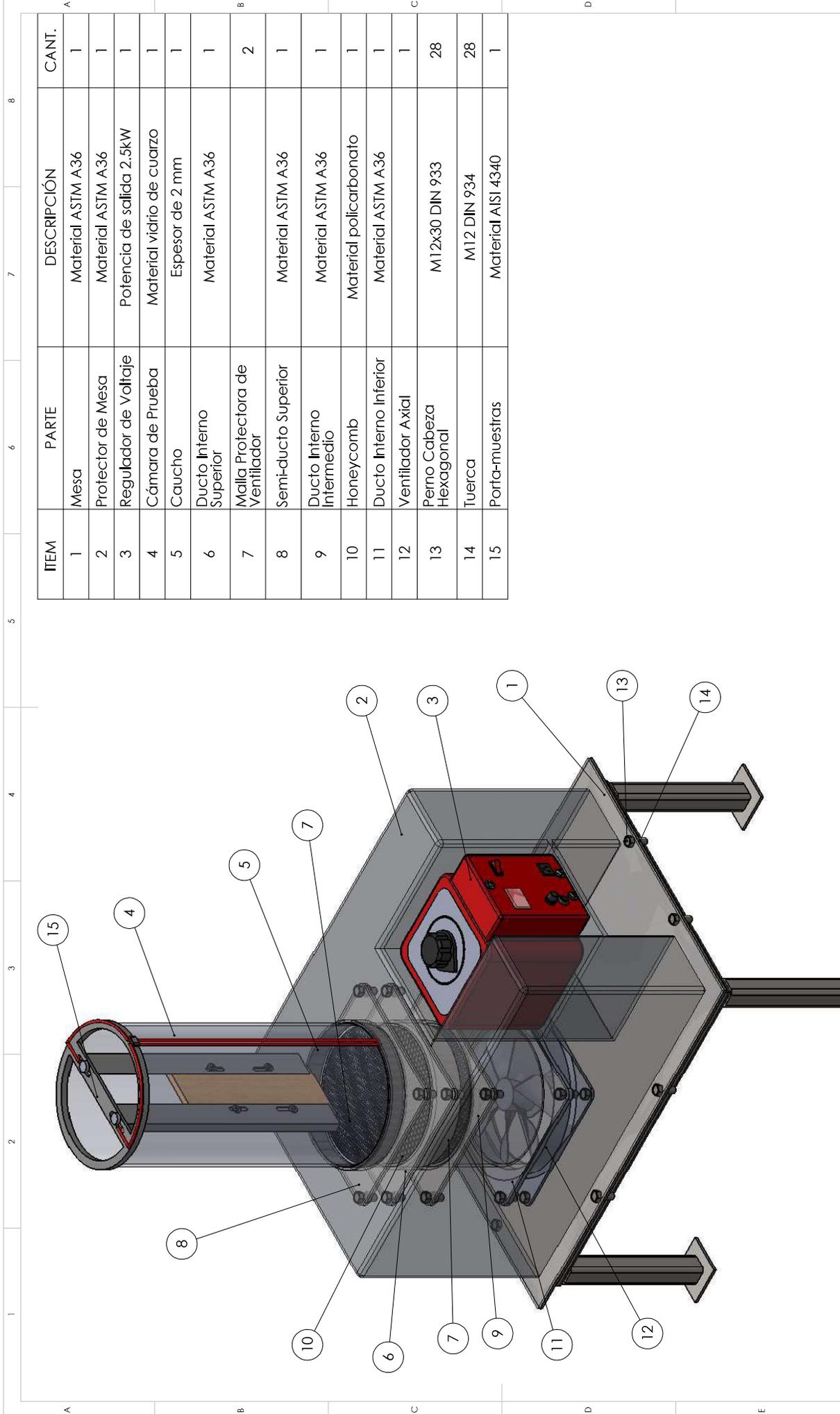


Figura D.9 Escala de resolución de resultados

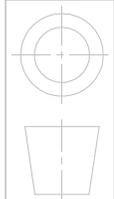
Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizada la configuración general, se procede ingresar los parámetros de entrada, tales como velocidad de giro del ventilador, generación de calor de la muestra y las condiciones de frontera. (Los parámetros utilizados en este trabajo se muestran en el Capítulo 2 y los resultados se muestran en el Capítulo 3).

APÉNDICE D
Planos esquemáticos



ITEM	PARTE	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	Mesa	Material ASTM A36	1
2	Protector de Mesa	Material ASTM A36	1
3	Regulador de Voltaje	Potencia de salida 2.5kW	1
4	Cámara de Prueba	Material vidrio de cuarzo	1
5	Caucho	Espesor de 2 mm	1
6	Ducto Interno Superior	Material ASTM A36	1
7	Mailla Protectora de Ventilador		2
8	Semi-ducto Superior	Material ASTM A36	1
9	Ducto Interno Intermedio	Material ASTM A36	1
10	Honeycomb	Material policarbonato	1
11	Ducto Interno Inferior	Material ASTM A36	1
12	Ventilador Axial		1
13	Perno Cabeza Hexagonal	M12x30 DIN 933	28
14	Tuerca	M12 DIN 934	28
15	Porta-muestras	Material AISI 4340	1



Escala: 1:10

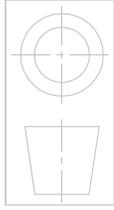
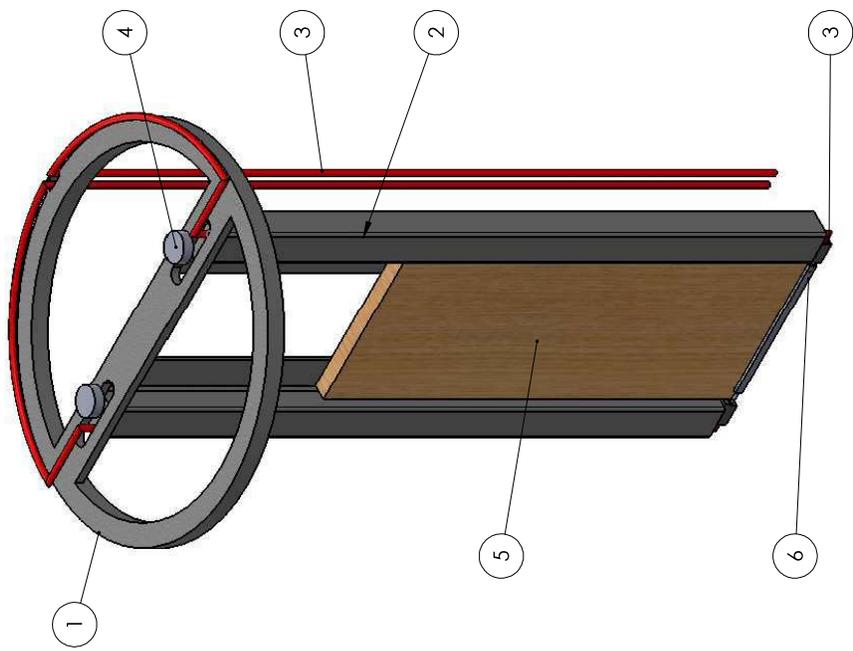
Nombre:	Fecha:
Dibujado por: Acosta Mite	08/01/2017
Aprobado por: Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

PROYECTO INTEGRADOR

No. 1

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	SopORTE Superior del Porta-muestra	Acero AISI 4340	1
2	Varilla del SopORTE Porta-muestra	Acero AISI 4340	2
3	Cables eléctricos	Calibre No.12 con aislamiento THW	2
4	Perno de Sujeción		2
5	Probeta	Dimensiones 120x300x12 mm	2
6	Resistencia Eléctrica	Un valor nominal de 2.3 ohmios por metro	1



Escala: 1:3

Dibujado por:	Nombre:	Fecha:
Aprobado por:	Acosta Mite	08/01/2017
	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

PROYECTO INTEGRADOR

No. 2

A

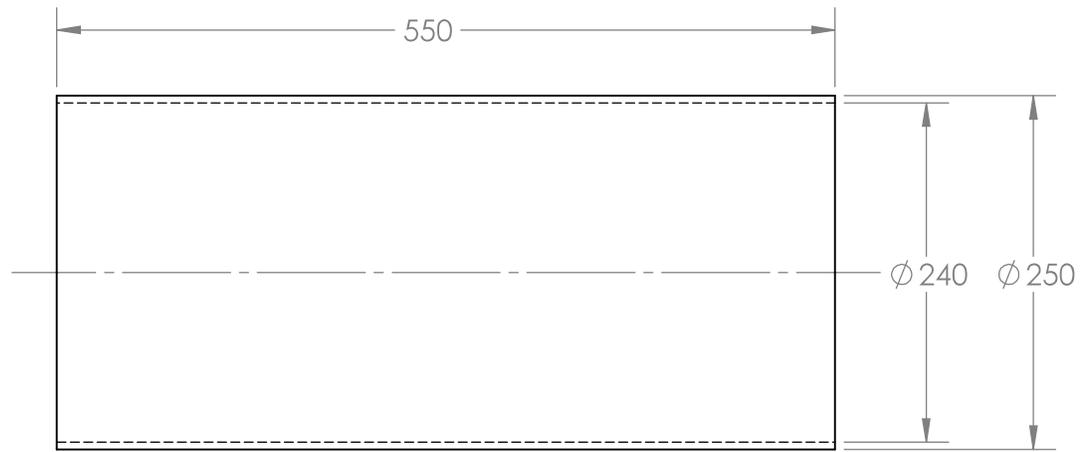
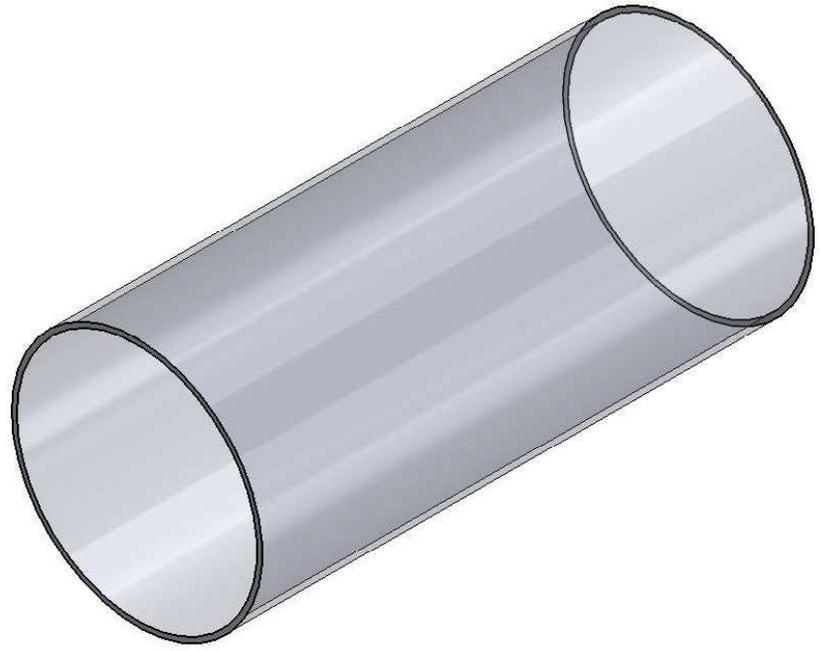
B

C

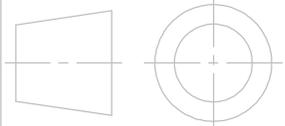
D

E

F



- Nota:
- Material: Cuarzo
 - Peso: 4.65 kg



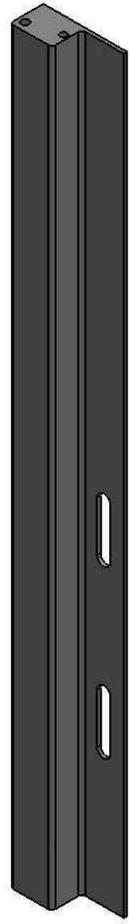
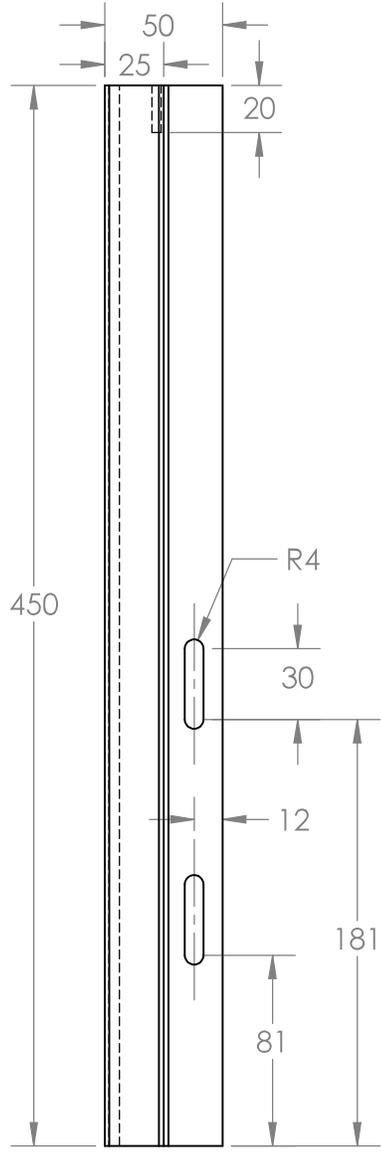
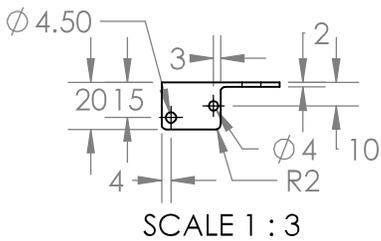
	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

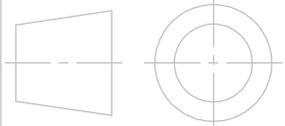
Escala:
1:5

PROYECTO INTEGRADOR

No.
3



- Nota:
- Material: Acero ASTM A36
 - Peso: 1.87 kg
 - 2 Pernos



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta - Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

Escala:
1:3

PROYECTO INTEGRADOR

No.
4

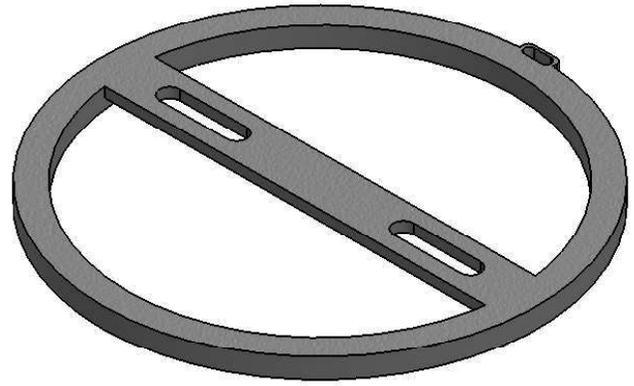
1

2

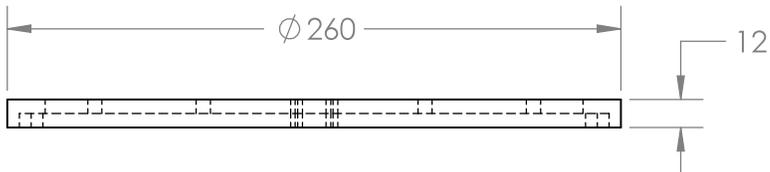
3

4

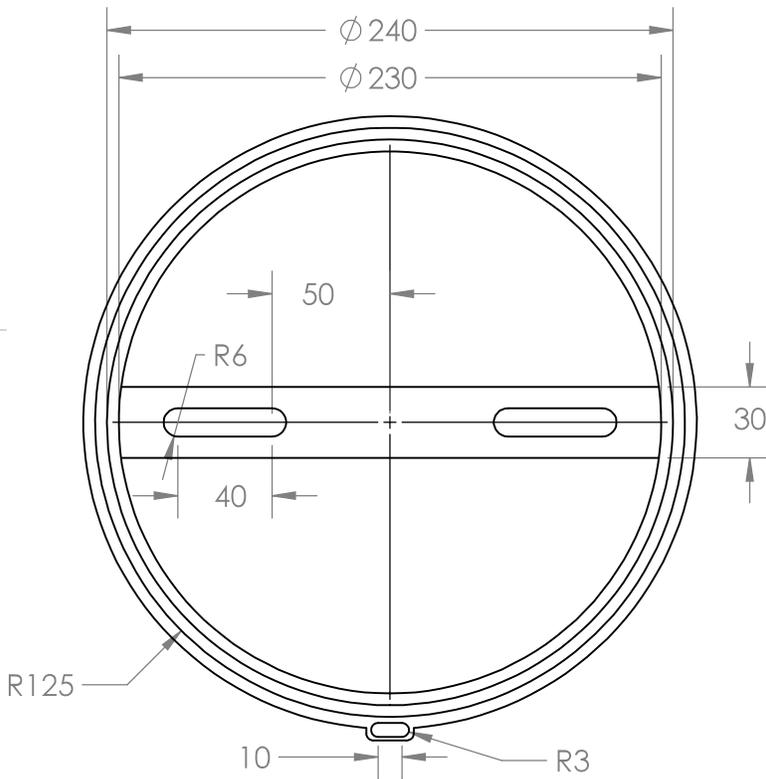
A



B



C

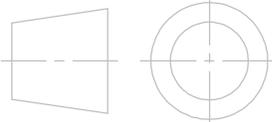


D

E

Nota:

- Material: Acero ASTM A36
- Peso: 1.17 kg



Nombre:	Fecha:
Dibujado por: Acosta - Mite	08/01/2017
Aprobado por: Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

F

Escala:

1:3**PROYECTO INTEGRADOR**

No.

5

A

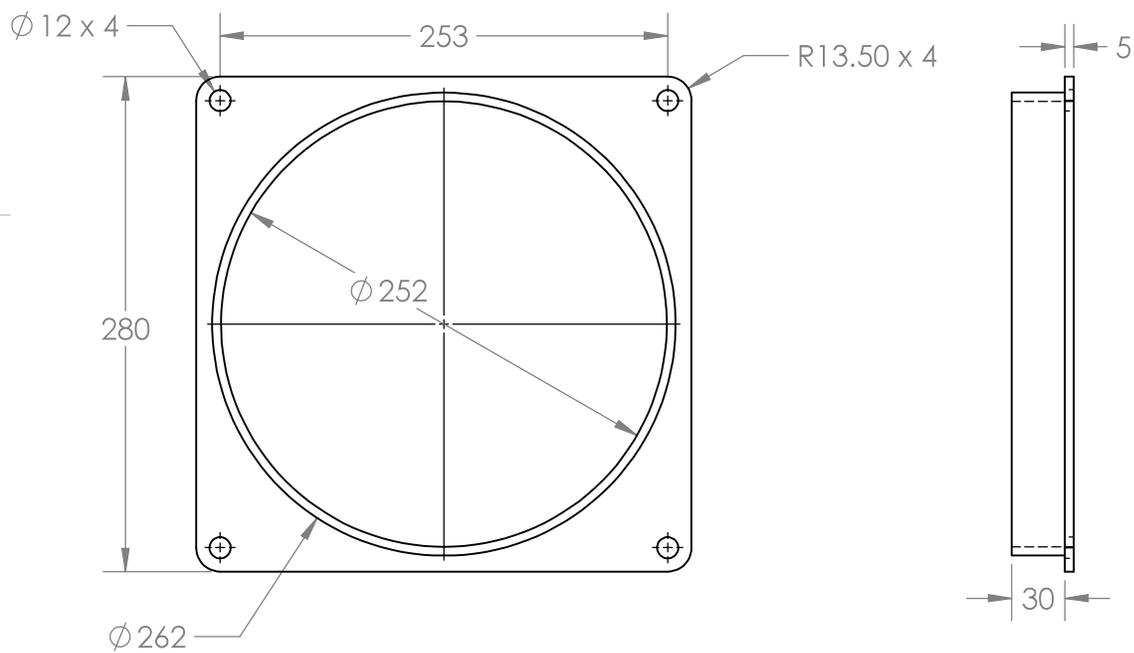
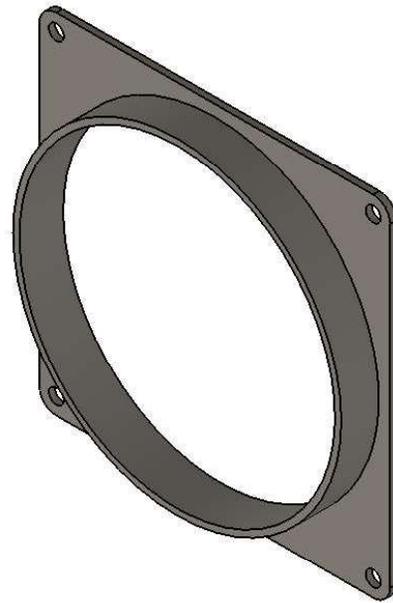
B

C

D

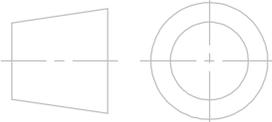
E

F



Nota:

- Material: Acero ASTM A36
- Peso: 2 kg
- 4 Pernos M12x30 DIN 933 - 8.8
- 4 Tuercas M12 DIN 934



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta - Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

Escala:

1:4

PROYECTO INTEGRADOR

No.

6

A

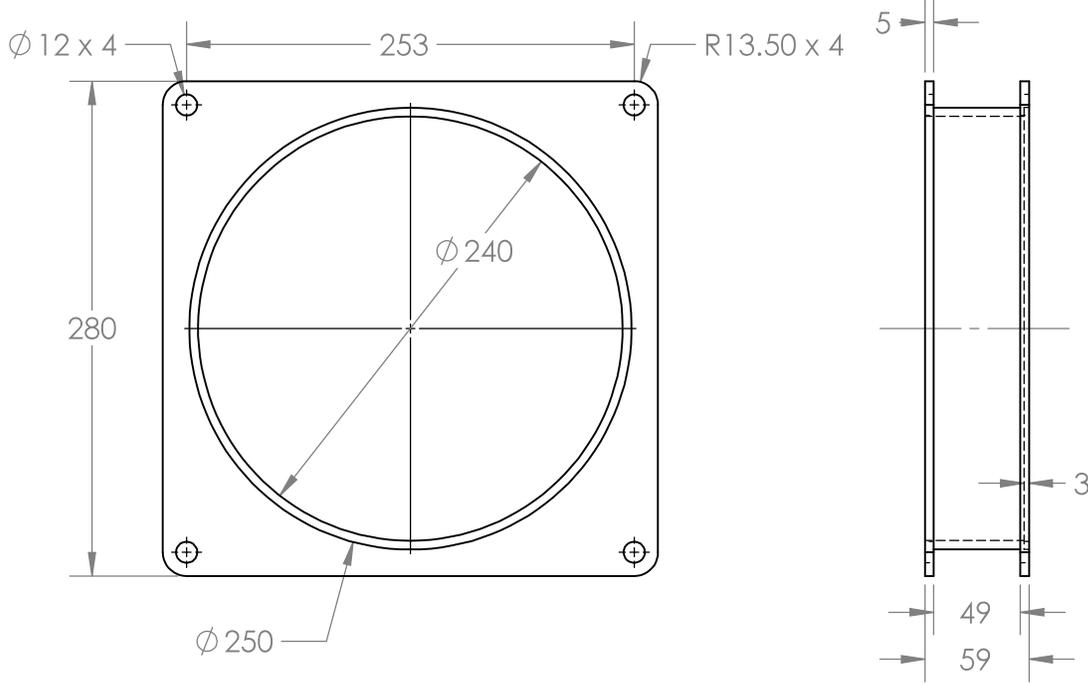
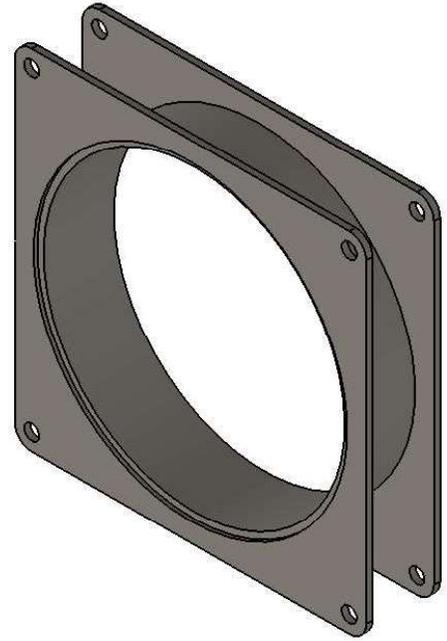
B

C

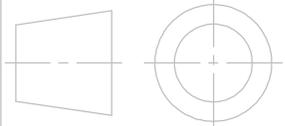
D

E

F



- Nota:
- Material: Acero ASTM A36
 - Peso: 3.9 kg
 - 4 Pernos M12x30 DIN 933 - 8.8
 - 4 Tuercas M12 DIN 934



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta - Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

Escala:
1:4

PROYECTO INTEGRADOR

No.
7

A

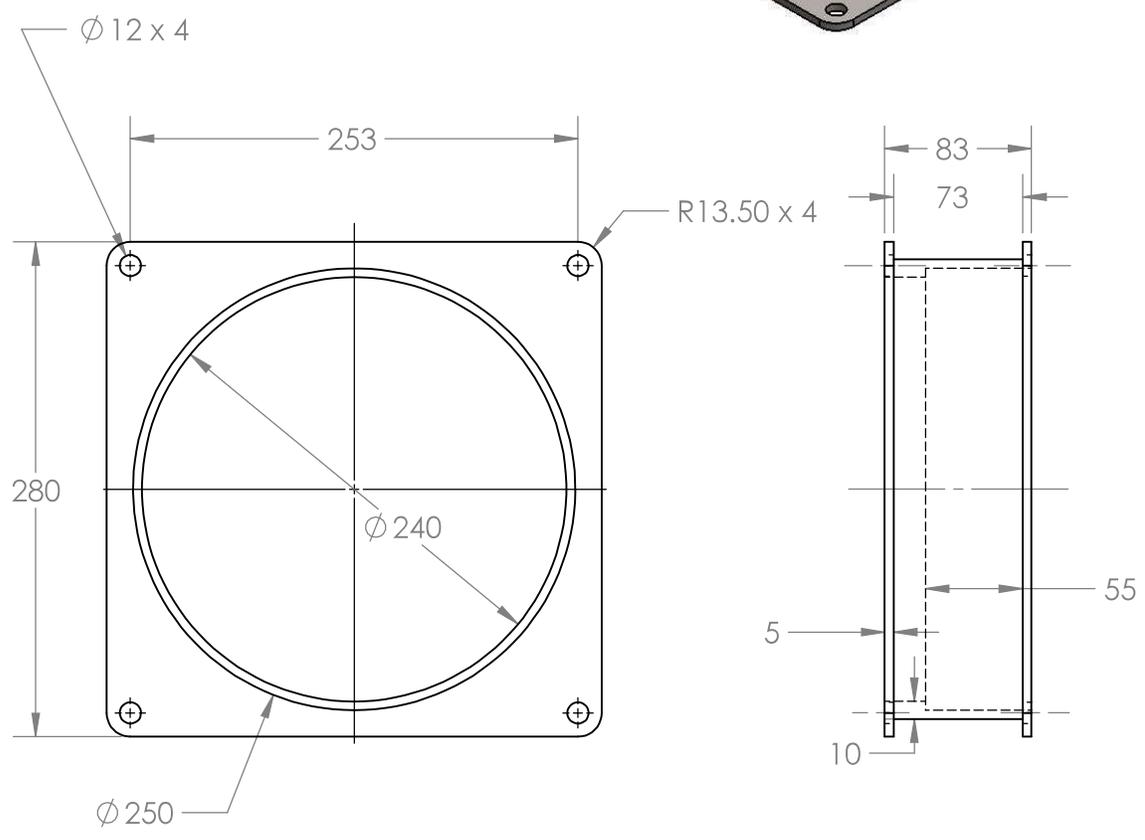
B

C

D

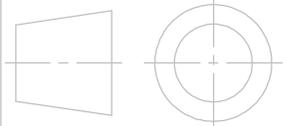
E

F



Nota:

- Material: Acero ASTM A36
- Peso: 5.2 kg
- 4 Pernos M12x30 DIN 933 - 8.8
- 4 Tuercas M12 DIN 934



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta - Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

Escala:
1:4

PROYECTO INTEGRADOR

No.
8

A

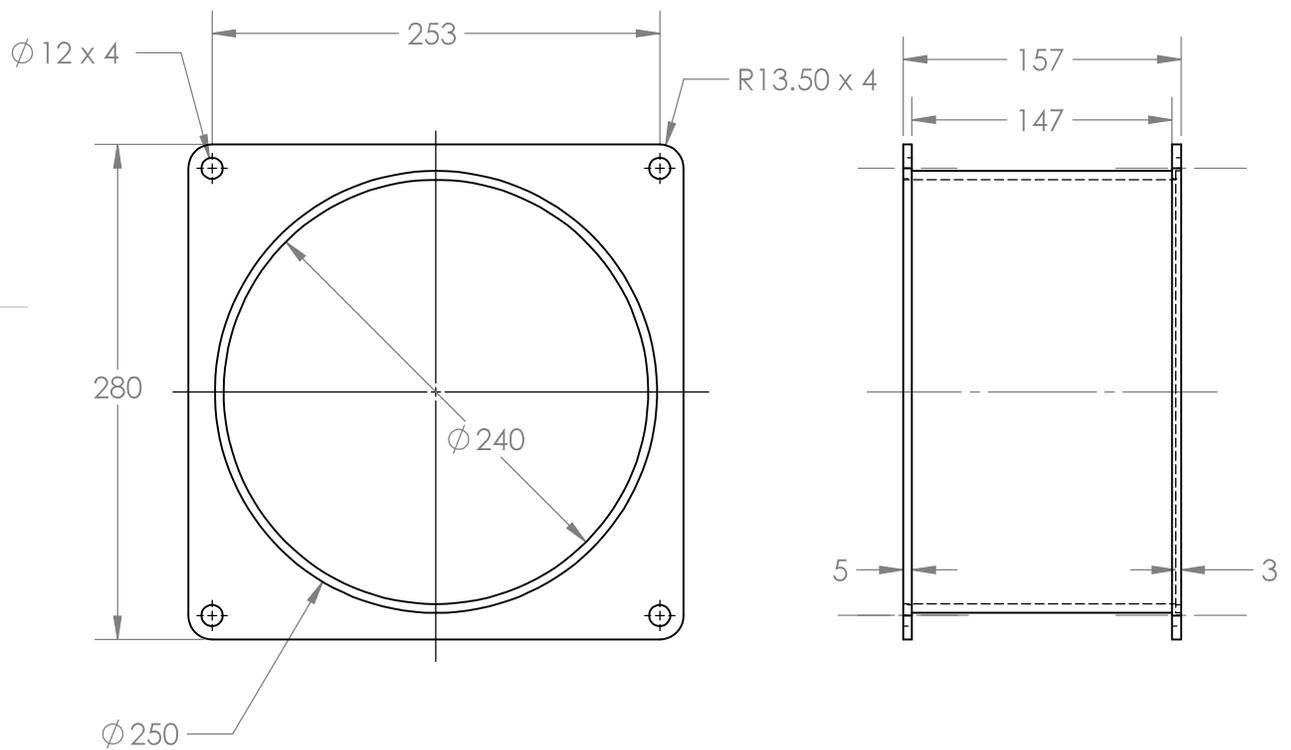
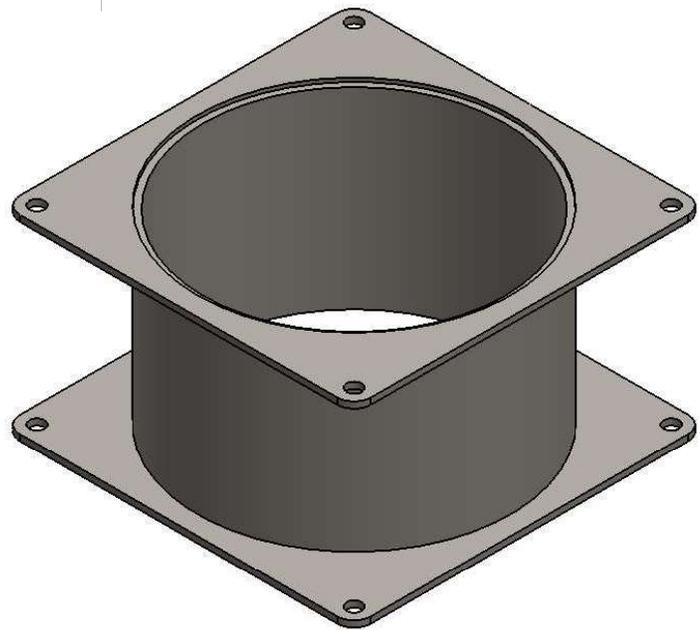
B

C

D

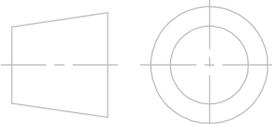
E

F



Nota:

- Material: Acero ASTM A36
- Peso: 6.9 kg
- 8 Pernos M12x30 DIN 933 - 8.8
- 8 Tuercas M12 DIN 934



	Nombre:	Fecha:	ESPOL
Dibujado por:	Acosta - Mite	08/01/2017	
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017	

Escala:

1:4

PROYECTO INTEGRADOR

No.

9

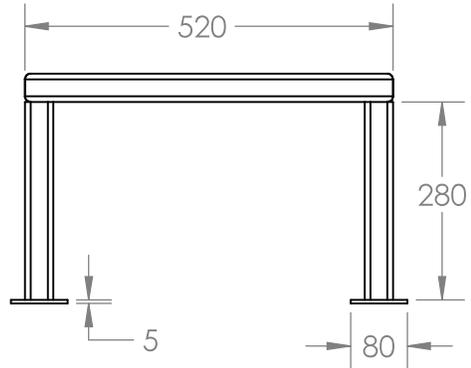
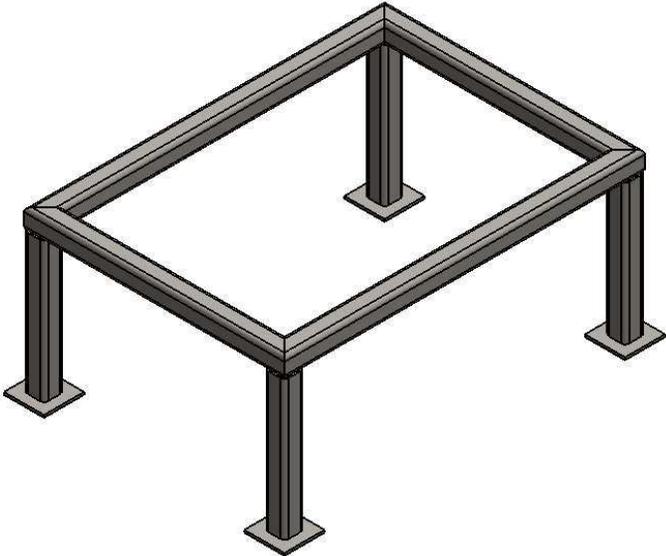
A

B

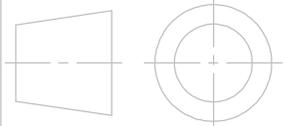
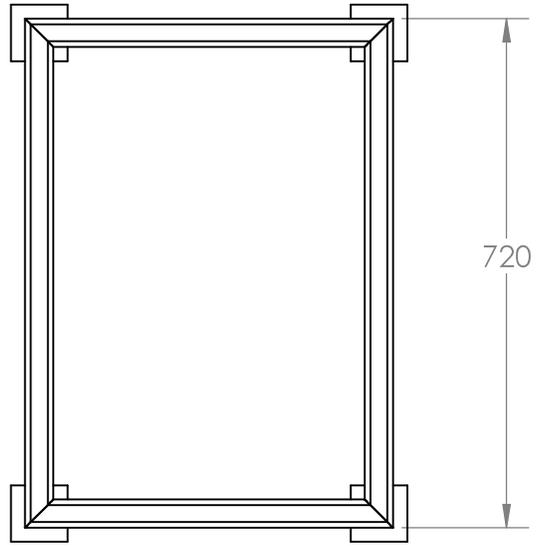
C

D

E



Tubo cuadrado: 40x40x4



Nombre:	Fecha:
Dibujado por: Acosta - Mite	08/01/2017
Aprobado por: Ing. Freddy J.	09/01/2017

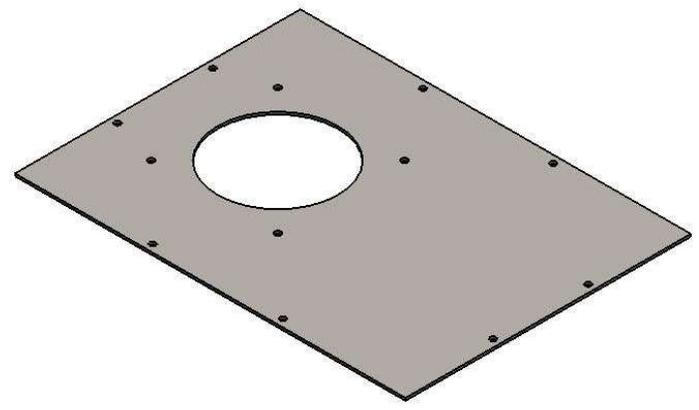
ESPOL

Escala:
1:10

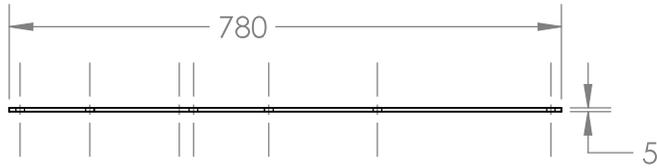
PROYECTO INTEGRADOR

No.
10

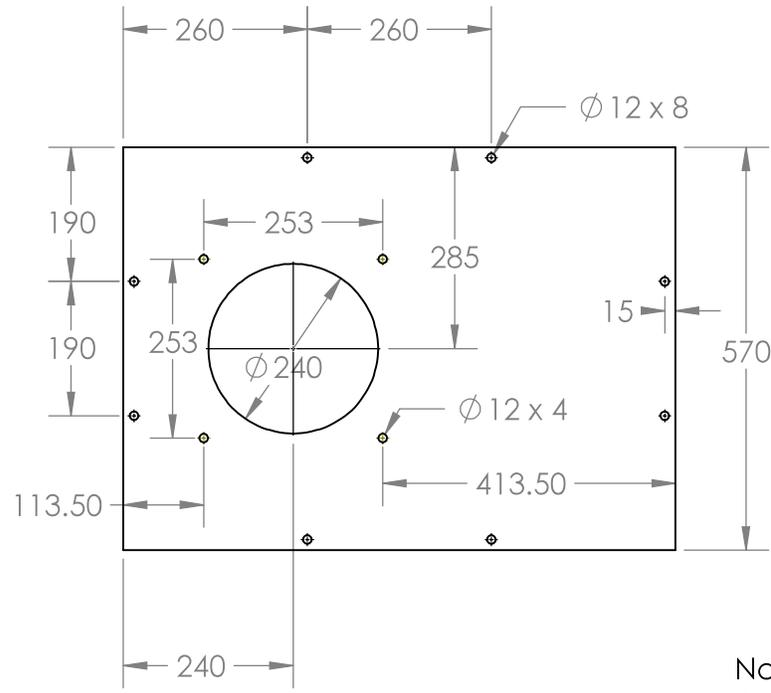
A



B



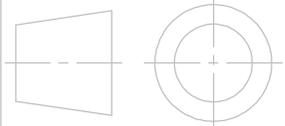
C



D

E

- Nota:
- Material: Acero ASTM A36
 - Peso: 1.5 kg
 - 12 Pernos M12x30 DIN 933 - 8.8
 - 12 Tuercas M12 DIN 934



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta - Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

F

Escala:
1:10

PROYECTO INTEGRADOR

No.
11

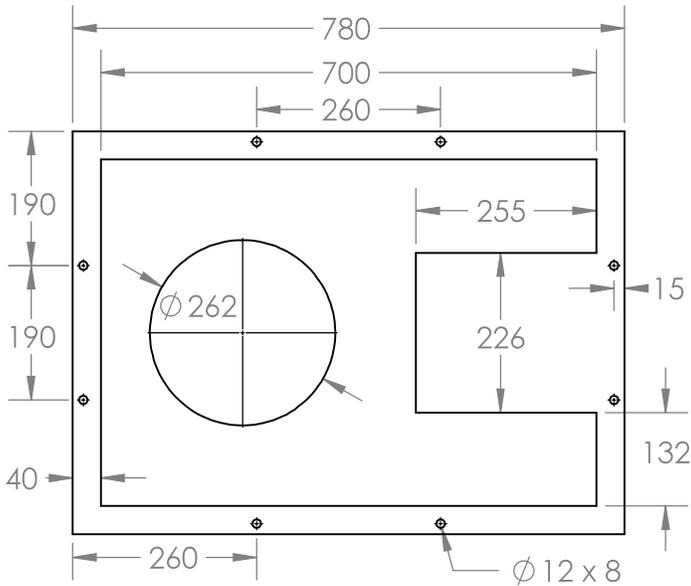
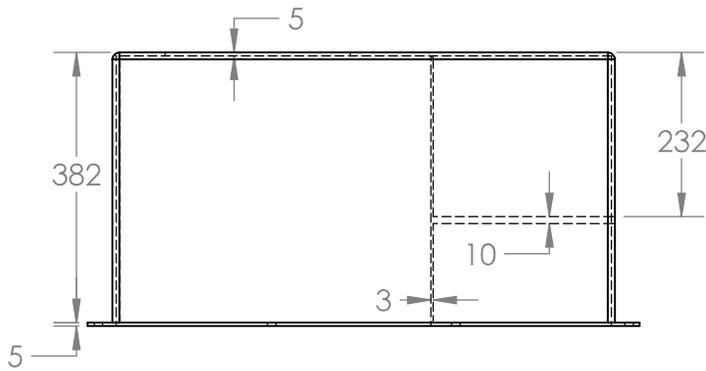
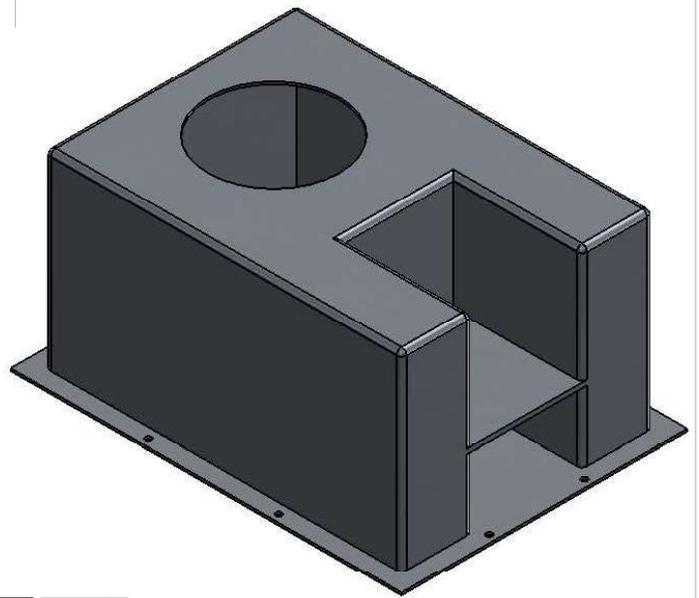
A

B

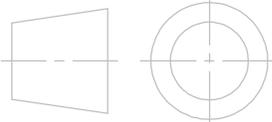
C

D

E



- Nota:
- Material: Aluminio
 - Peso: 20 kg



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta - Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

F

Escala:
1:10

PROYECTO INTEGRADOR

No.
12

A

B

C

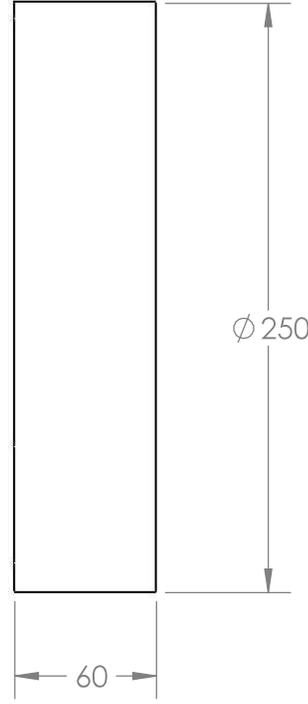
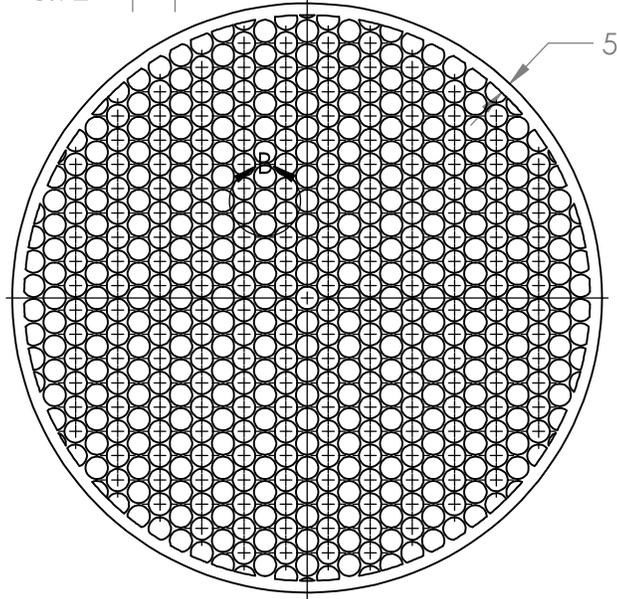
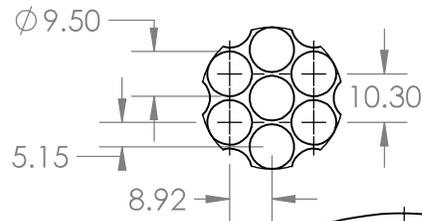
D

E

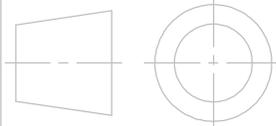
F



DETAIL B
SCALE 2 : 3



Material:
• Policarbonato



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

Escala:
1:3

PROYECTO INTEGRADOR

No.
13

1

2

3

4

A

B

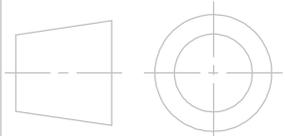
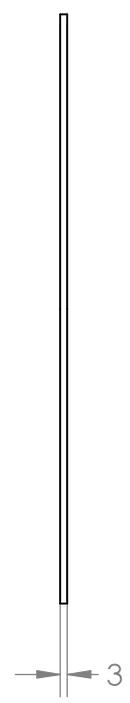
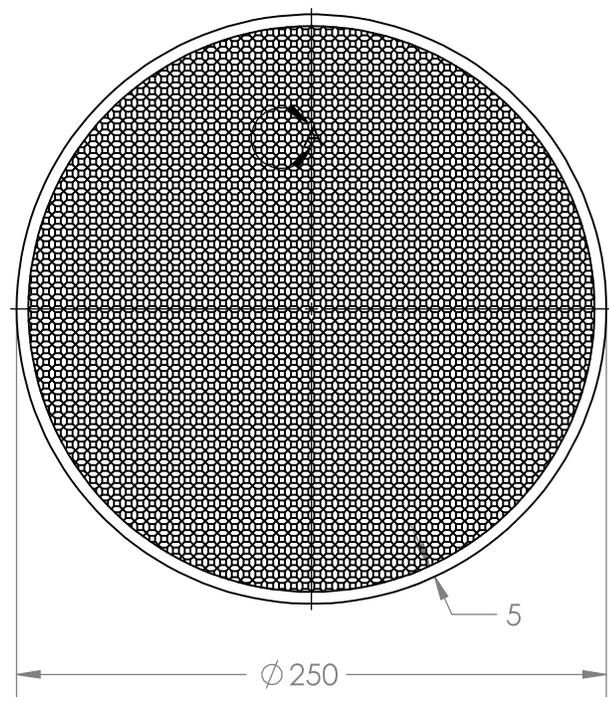
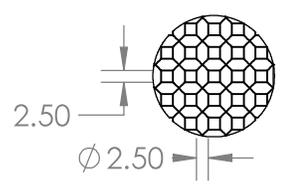
C

D

E



DETAIL A
SCALE 2 : 3



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

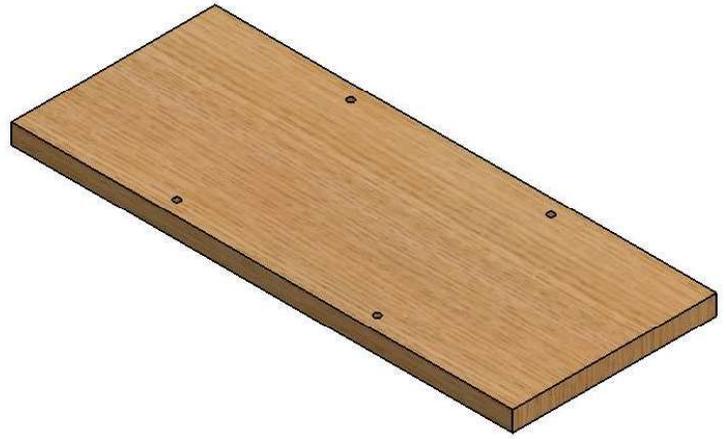
F

Escala:
1:3

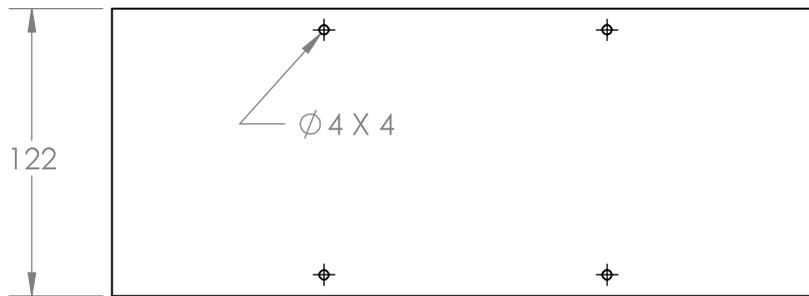
PROYECTO INTEGRADOR

No.
14

A

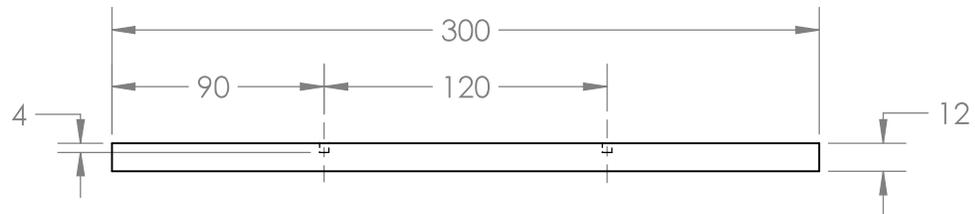


B



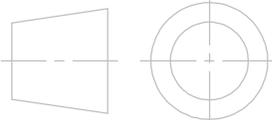
C

D



E

- Materiales:
- Madera derivados
 - PMMA
 - Polipropileno
 - Poliuretano



	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Acosta Mite	08/01/2017
Aprobado por:	Ing. Freddy J.	09/01/2017

ESPOL

F

Escala:
1:3

PROYECTO INTEGRADOR

No.
15

APÉNDICE E
Código EES

$$Re=(\rho \cdot V_{\text{media}} \cdot d)/\mu$$

$$V_{\text{media}}=U_{\text{max}}/2$$

$$d=240 \cdot \text{convert}(\text{mm};\text{m})$$

{Régimen laminar}

$$Re=2300$$

$$\rho = \text{Density}(\text{Air}; T=T_{\text{emp}}; P=P_{\text{o}})$$

$$P_{\text{o}}=101,3 \text{ [kPa]}$$

$$\mu = \text{Viscosity}(\text{Air}; T=T_{\text{emp}})$$

{Longitud de Entrada en Re=2300}

$$L_e=0,06 \cdot Re \cdot d$$

{Pérdidas de presión}

{Ducto Circular}

$$L=900 \cdot \text{convert}(\text{mm};\text{m})$$

$$\rho_{\text{aire}} = \text{Density}(\text{Air}; T=T_{\text{media}}; P=P_{\text{o}})$$

$$T_{\text{media}} = (T_{\text{infinity}} + T_{\text{s}})/2$$

$$T_{\text{s}}=196,43 \text{ [C]}$$

$$\text{DELTA}P_{\text{camara}} = (K_{\text{camara}} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot V_{\text{media}}^2)/2$$

$$K_{\text{camara}} = (f \cdot L)/d$$

$$f=64/Re$$

{Honeycomb}

$$K_{\text{hon}} = \lambda_{\text{hon}} \cdot (L_{\text{h}}/D_{\text{h}} + 3) \cdot (1/\beta_{\text{hon}})^2 + (1/\beta_{\text{hon}} - 1)^2$$

$$L_{\text{h}}=60 \cdot \text{convert}(\text{mm};\text{m})$$

$$D_{\text{h}}=9,5 \cdot \text{convert}(\text{mm};\text{m})$$

$$\beta_{\text{hon}}=0,8 \text{ {circular}}$$

$$\lambda_{\text{hon}}=0,214 \cdot (\epsilon_{\text{plast}}/D_{\text{h}})^{0,4} \text{ {para Reynolds}>275}$$

$$\epsilon_{\text{plast}}=0,0015 \cdot \text{convert}(\text{mm};\text{m})$$

$$\text{DELTA}P_{\text{hon}} = K_{\text{hon}} \cdot 0,5 \cdot \rho_{\text{air}} \cdot V_{\text{media}}^2$$

{Malla}

$$K_{\text{malla2}} = 0,52 \cdot ((1 - \beta_{\text{malla}}^2)/\beta_{\text{malla}}^2) \text{ {malla después del honeycomb}}$$

$$\beta_{\text{malla}}=0,6$$

$$K_{\text{malla1}} = ((1 - 0,95 \cdot \beta_{\text{malla}}^2)/(0,95 \cdot \beta_{\text{malla}})) + 55,2/Re_d \text{ {malla antes del honeycomb}}$$

$$Re_d = (\rho_d \cdot V_{\text{mediad}} \cdot d_d)/\mu_d \text{ {Reynolds basado en el Din de los agujeros}}$$

$$\rho_d = \text{Density}(\text{Air}; T=T_{\text{amb}}; P=P_{\text{amb}})$$

$$T_{\text{amb}}=25 \text{ [C]}$$

$$P_{\text{amb}}=101,3 \text{ [kPa]}$$

$$\mu_d = \text{Viscosity}(\text{Air}; T=T_{\text{amb}})$$

$$d_d=3 \cdot \text{convert}(\text{mm};\text{m})$$

$$V_{\text{mediad}}=0,1057 \text{ [m/s]}$$

$$\text{DELTA}P_{\text{malla1}} = K_{\text{malla1}} \cdot 0,5 \cdot \rho_d \cdot V_{\text{media}}^2$$

$$\text{DELTA}P_{\text{malla2}} = K_{\text{malla2}} \cdot 0,5 \cdot \rho_d \cdot V_{\text{media}}^2$$

{Espesor de Capa Limite por Transferencia de calor Conv Forzada}

$$T_f = (T_{\text{infinity}} + T_{\text{pirolisis}})/2$$

rho_air=Density(Air;T=T_f;P=P_o)
T_infinity=25 [C]

{T_s=T_emp [C]}

mu_air=Viscosity(Air;T=T_f)

nu_air=mu_air/rho_air

Re_L=(U_max*L_muestra)/nu_air

L_muestra=300*convert(mm;m)

delta_L=(5*L_muestra)/(Re_L^(1/2))

{Espesor de Capa Limite Hidrodinámica}

L_e/L_vidrio=(d/2)/delta_H

L_vidrio=550*convert(mm;m)

{Espacio para muestra}

e_placa=20*convert(mm;m)

E_libre=(d/2)-delta_H-delta_L-(e_placa/2)

E=m_dot*DELTAH

DELTAH=26.56 [kJ/g]

m_dot=m_loss/A_s {g/(sm^2)}

m_loss=0.02735 {g/s}

E_1=E*A_s

E_1=m_dot_air*C_p*(T_mo-T_mi)

C_p=Cp(Air;T=T_m)

T_mi=25

V_media=0.2661 {V_media máxima}

m_dot_air=rho_air*A*V_media

T_m=(T_mo1+T_mi)/2

rho_air=Density(Air;T=T_m,P=P_atm)

T_mo1=142.16

P_atm=101.3 [kPa]

A=(pi*d_cil^2)/8

d_cil=0.244

q_conv=E_1*convert(kJ/s,J/s)

A_s=L_placa*d_ancho

L_placa=30*convert(cm,m)

d_ancho=12*convert(cm,m)

q_conv=h_convin*A_in*(T_s-T_mo)+h_convout*A_out*(T_s-T_mi)

q_conv1=h_convin*A_in*(T_s-T_mo)

q_conv2=h_convout*A_out*(T_s-T_mi)

DELTAT_o=T_s1-T_mo

DELTAT_i=T_s1-T_mi

DELTAT_o/DELTAT_i=exp(-(h_convin*A_s)/(m_dot_air*C_p))

A_in=pi*d_cil*L_vidrio/2

L_vidrio=550*convert(mm,m)

A_out=pi*d_out*L_vidrio/2 {d_out diametro externo del vidrio}

d_out=d_cil+2*e_vidrio

e_vidrio=5*convert(mm,m)

```

N_uDout=(0.68+((0.670*Ra_L^(0.25))/(1+(0.492/Pr)^(9/16)))^(4/9))
Ra_L=(g*beta*(T_s-T_infinity)*L_vidrio^3)/(nu_out*alpha) {difusividad termica}
Gr_L=(g*beta*(T_s-T_infinity)*L_vidrio^3)/(nu_out^2) {difusividad termica}
g=9.81
beta=1/T_f1
T_f1=T_f+273
T_f=(T_s1+T_infinity)/2
h_convout=k_out*N_uDout/D_h
k_out=Conductivity(Air,T=T_f)
Pr=Prandtl(Air,T=T_f)
mu_out=Viscosity(Air,T=T_f)
rho_out=Density(Air,T=T_f,P=P_atm)
nu_out=mu_out/rho_out
alpha=31.58E-6
D_h=4*A/P
P=(pi*d_cil/2)+d_cil

T_infinity=T_mi
T_s1=158.8

```

APÉNDICE F
Resultados software AspenTech

1	 LEGENDS Burlington, MA USA		Case Name: Porcentaje de Oxígeno con tanque de O2.hsc			
2			Unit Set: EuroSI			
3			Date/Time: Sun Feb 18 19:16:50 2018			
4						
5						
6	Mixer: Cámara de Mezcla					
7	CONNECTIONS					
8	Inlet Stream					
9	STREAM NAME		FROM UNIT OPERATION			
10	Aire					
11	Oxígeno					
12	Nitrógeno					
13	Outlet Stream					
14	STREAM NAME		TO UNIT OPERATION			
15	Mezcla					
16	PARAMETERS					
17	User Variables					
18	NOZZLE PARAMETERS					
19	Base Elevation Relative to Ground Level				0.0000 m *	
20		Aire	Oxígeno	Nitrógeno		
21	Diameter (m)	5.000e-002	5.000e-002	5.000e-002		
22	Elevation (Base) (m)	0.0000	0.0000	0.0000		
23	Elevation (Ground) (m)	0.0000	0.0000	0.0000		
24		Mezcla				
25	Diameter (m)	5.000e-002				
26	Elevation (Base) (m)	0.0000				
27	Elevation (Ground) (m)	0.0000				
28	CONDITIONS					
29	Name	Aire	Oxígeno	Nitrógeno	Mezcla	
30	Vapour	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
31	Temperature (C)	25.0000 *	15.0000 *	15.0000 *	21.8840	
32	Pressure (bar)	1.0132 *	4.4606 *	4.4606 *	1.0132	
33	Molar Flow (kgmole/h)	13.4765	0.0000	5.3547	18.8311	
34	Mass Flow (kg/h)	388.8000 *	0.0000 *	150.0000 *	538.8000	
35	Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	0.4495	0.0000	0.1860	0.6355	
36	Molar Enthalpy (kcal/kgmole)	-1.956	-80.22	-78.31	-23.67	
37	Molar Entropy (kJ/kgmole-C)	151.7	131.6	134.7	150.8	
38	Heat Flow (kcal/h)	-2.6357e+01	-0.0000e-01	-4.1931e+02	-4.4567e+02	
39	PROPERTIES					
40	Name	Aire	Oxígeno	Nitrógeno	Mezcla	
41	Molecular Weight	28.85	32.00	28.01	28.61	
42	Molar Density (kgmole/m3)	4.090e-002	0.1871	0.1866	4.133e-002	
43	Mass Density (kg/m3)	1.180	5.986	5.228	1.183	
44	Act. Volume Flow (m3/h)	329.5	0.0000	28.69	455.6	
45	Mass Enthalpy (kcal/kg)	-6.779e-002	-2.507	-2.795	-0.8272	
46	Mass Entropy (kJ/kg-C)	5.258	4.112	4.807	5.271	
47	Heat Capacity (kJ/kgmole-C)	29.20	29.33	29.34	29.18	
48	Mass Heat Capacity (kJ/kg-C)	1.012	0.9166	1.048	1.020	
49	LHV Vol Basis (Std) (kcal/kgmole)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
50	LHV Mass Basis (Std) (kcal/kg)	---	---	---	---	
51	Phase Fraction [Vol. Basis]	1.000	1.000	1.000	1.000	
52	Phase Fraction [Mass Basis]	1.000	1.000	1.000	1.000	
53	Partial Pressure of CO2 (bar)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
54	Cost Based on Flow (Cost/s)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
55	Act. Gas Flow (ACT_m3/h)	329.5	0.0000	28.69	455.6	
56	Avg. Liq. Density (kgmole/m3)	29.98	---	28.79	29.63	
57	Specific Heat (kJ/kgmole-C)	29.20	29.33	29.34	29.18	
58	Std. Gas Flow (STD_m3/h)	318.6	0.0000	126.6	445.3	
59	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 7.2 (24.0.0.7263)		Page 1 of 2	



LEGENDS
Burlington, MA
USA

Case Name: Porcentaje de Oxigeno con tanque de O2.hsc

Unit Set: EuroSI

Date/Time: Sun Feb 18 19:16:50 2018

Mixer: Cámara de Mezcla (continued)

PROPERTIES

Name	Aire	Oxigeno	Nitrógeno	Mezcla
Std. Ideal Liq. Mass Density (kg/m3)	865.1	1138	806.4	847.9
Act. Liq. Flow (m3/s)	---	---	---	---
Z Factor	0.9994	0.9953	0.9976	0.9994
Watson K	6.042	4.786	6.415	6.146
User Property	---	---	---	---
Partial Pressure of H2S (bar)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Cp/(Cp - R)	1.398	1.396	1.395	1.398
Cp/Cv	1.401	1.411	1.410	1.402
Heat of Vap. (kcal/kgmole)	1409	1477	1181	1387
Kinematic Viscosity (cSt)	15.96	3.414	3.428	15.68
Liq. Mass Density (Std. Cond) (kg/m3)	---	---	---	---
Liq. Vol. Flow (Std. Cond) (m3/h)	---	0.0000	---	---
Liquid Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Molar Volume (m3/kgmole)	24.45	5.346	5.358	24.20
Mass Heat of Vap. (kcal/kg)	48.84	46.15	42.18	48.48
Phase Fraction [Molar Basis]	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Surface Tension (dyne/cm)	---	---	---	---
Thermal Conductivity (W/m-K)	2.592e-002	2.568e-002	2.528e-002	2.566e-002
Viscosity (cP)	1.883e-002	2.044e-002	1.792e-002	1.854e-002
Cv (Semi-Ideal) (kJ/kgmole-C)	20.88	21.02	21.03	20.87
Mass Cv (Semi-Ideal) (kJ/kg-C)	0.7239	0.6568	0.7507	0.7293
Cv (kJ/kgmole-C)	20.84	20.78	20.82	20.82
Mass Cv (kJ/kg-C)	0.7223	0.6495	0.7431	0.7276
Cv (Ent. Method) (kJ/kgmole-C)	---	---	---	---
Mass Cv (Ent. Method) (kJ/kg-C)	---	---	---	---
Cp/Cv (Ent. Method)	---	---	---	---
Reid VP at 37.8 C (bar)	---	---	---	---
True VP at 37.8 C (bar)	---	---	---	---
Liq. Vol. Flow - Sum(Std. Cond) (m3/h)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Viscosity Index	26.04	16.26	16.29	25.95

DYNAMICS

Pressure Specification: Set Outlet to Lowest Inlet

Holdup Details

Phase	Accumulation (kgmole/h)	Moles (kgmole)	Volume (m3)
Vapour	0.0000	0.0000	0.0000
Liquid	0.0000	0.0000	0.0000
Aqueous	0.0000	0.0000	0.0000
Total	0.0000	0.0000	0.0000

NOTES



LEGENDS
Burlington, MA
USA

Case Name: NoName_4.hsc
Unit Set: EuroSI
Date/Time: Sun Feb 18 13:37:39 2018

Case Study Manager: Main

Data Recorder Results:

State						
-------	--	--	--	--	--	--

Case Studies: Case Study 1

Independent Variables				Dependent Variables	
Variable	Low Bound	High Bound	Step Size	Variable	Display
Oxigeno - Mass Flow	0.00 kg/h *	56.00 kg/h *	1.000 kg/h *	uctBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	Enabled

Input Data

State Input Type: Nested	Number of States: 57
--------------------------	----------------------

Case Studies Results

State	State 1	State 2	State 3	State 4	State 5	State 6
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	0.0000	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2100	0.2118	0.2136	0.2155	0.2173	0.2191
State	State 7	State 8	State 9	State 10	State 11	State 12
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	6.000	7.000	8.000	9.000	10.00	11.00
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2208	0.2226	0.2244	0.2262	0.2279	0.2296
State	State 13	State 14	State 15	State 16	State 17	State 18
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2314	0.2331	0.2348	0.2366	0.2383	0.2400
State	State 19	State 20	State 21	State 22	State 23	State 24
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2417	0.2433	0.2450	0.2467	0.2483	0.2500
State	State 25	State 26	State 27	State 28	State 29	State 30
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	24.00	25.00	26.00	27.00	28.00	29.00
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2516	0.2533	0.2549	0.2565	0.2582	0.2598
State	State 31	State 32	State 33	State 34	State 35	State 36
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	30.00	31.00	32.00	33.00	34.00	35.00
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2614	0.2630	0.2646	0.2662	0.2677	0.2693
State	State 37	State 38	State 39	State 40	State 41	State 42
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	36.00	37.00	38.00	39.00	40.00	41.00
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2709	0.2724	0.2740	0.2755	0.2771	0.2786
State	State 43	State 44	State 45	State 46	State 47	State 48
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	42.00	43.00	44.00	45.00	46.00	47.00
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2801	0.2816	0.2831	0.2846	0.2861	0.2876
State	State 49	State 50	State 51	State 52	State 53	State 54
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	48.00	49.00	50.00	51.00	52.00	53.00
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2891	0.2906	0.2921	0.2935	0.2950	0.2965
State	State 55	State 56	State 57			
Oxigeno - Mass Flow (kg/h)	54.00	55.00	56.00			
ProductBlock_Mezcla - Composition (Oxygen)	0.2979	0.2994	0.3008			

Transpose Table Output

States		Independent Variables		Dependent Variables	
57		1 *		1 *	
State	Oxigeno - Mass Flow	ck_Mezcla - Compositio			
Dimensionless	kg/h	Dimensionless			
State 1	0.0000 *	0.2100 *			
State 2	1.000 *	0.2118 *			
State 3	2.000 *	0.2136 *			
State 4	3.000 *	0.2155 *			
State 5	4.000 *	0.2173 *			
State 6	5.000 *	0.2191 *			
State 7	6.000 *	0.2208 *			
State 8	7.000 *	0.2226 *			
State 9	8.000 *	0.2244 *			
State 10	9.000 *	0.2262 *			



LEGENDS
Burlington, MA
USA

Case Name: NoName_4.hsc
Unit Set: EuroSI
Date/Time: Sun Feb 18 13:37:39 2018

Case Study Manager: Main (continued)

Transpose Table Output

11	State 11	10.00 *	0.2279 *				
12	State 12	11.00 *	0.2296 *				
13	State 13	12.00 *	0.2314 *				
14	State 14	13.00 *	0.2331 *				
15	State 15	14.00 *	0.2348 *				
16	State 16	15.00 *	0.2366 *				
17	State 17	16.00 *	0.2383 *				
18	State 18	17.00 *	0.2400 *				
19	State 19	18.00 *	0.2417 *				
20	State 20	19.00 *	0.2433 *				
21	State 21	20.00 *	0.2450 *				
22	State 22	21.00 *	0.2467 *				
23	State 23	22.00 *	0.2483 *				
24	State 24	23.00 *	0.2500 *				
25	State 25	24.00 *	0.2516 *				
26	State 26	25.00 *	0.2533 *				
27	State 27	26.00 *	0.2549 *				
28	State 28	27.00 *	0.2565 *				
29	State 29	28.00 *	0.2582 *				
30	State 30	29.00 *	0.2598 *				
31	State 31	30.00 *	0.2614 *				
32	State 32	31.00 *	0.2630 *				
33	State 33	32.00 *	0.2646 *				
34	State 34	33.00 *	0.2662 *				
35	State 35	34.00 *	0.2677 *				
36	State 36	35.00 *	0.2693 *				
37	State 37	36.00 *	0.2709 *				
38	State 38	37.00 *	0.2724 *				
39	State 39	38.00 *	0.2740 *				
40	State 40	39.00 *	0.2755 *				
41	State 41	40.00 *	0.2771 *				
42	State 42	41.00 *	0.2786 *				
43	State 43	42.00 *	0.2801 *				
44	State 44	43.00 *	0.2816 *				
45	State 45	44.00 *	0.2831 *				
46	State 46	45.00 *	0.2846 *				
47	State 47	46.00 *	0.2861 *				
48	State 48	47.00 *	0.2876 *				
49	State 49	48.00 *	0.2891 *				
50	State 50	49.00 *	0.2906 *				
51	State 51	50.00 *	0.2921 *				
52	State 52	51.00 *	0.2935 *				
53	State 53	52.00 *	0.2950 *				
54	State 54	53.00 *	0.2965 *				
55	State 55	54.00 *	0.2979 *				
56	State 56	55.00 *	0.2994 *				
57	State 57	56.00 *	0.3008 *				