



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELACIÓN CFD DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN
SECADORA DE ROPA Y SU VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. GUILLERMO DU POND DE LA GARZA

DIRECTORES DE TESIS:

DR. ÁLVARO SÁNCHEZ RODRÍGUEZ

M. I. VÍCTOR HUGO MIRANDA RAZO

M. C. ELEAZAR ÁLVAREZ CHÁVEZ

CELAYA, GTO.

ABRIL, 2024

DEDICATORIAS

A mis padres, Adriana de la Garza y Arturo Du Pond, por creer en mí, por darme todo el apoyo y la ayuda durante toda mi estadía en el posgrado y siempre, para estar donde estoy.

A mis compañeros del programa de desarrollo de ingenieros globales Emanuel Luna, Roberto Ramirez, Emmanuel Tirado, Diana Martinez, Maricruz Reyes, Sebastian Muñoz, Ulises Naranjo y Elías Torres; por su amistad y apoyo para crecer como profesionalista.

A mis compañeros del posgrado Kevin Ramirez y Sandra Rojas, Por su invaluable ayuda.

A mis hermanos...

A mi familia...

Al departamento de Ingeniería Mecánica...

Al subsistema de estructura de cuidado de la ropa de Mabe...

Al comité de desarrollo de ingenieros globales...

A todos los que me apoyaron para llegar hasta aquí. Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profusamente al CONAHCYT y al Tecnológico Nacional de México en Celaya por apoyo brindado en estudio de la maestría en ciencias en ingeniería mecánica. Especialmente al Dr. Álvaro Sánchez, Dr. Daniel Aguilera, al M.C. Benjamín Arroyo, a la Dra. Karla Moreno, Al Dr. Horacio Orozco, al Dr. Ramón Rodríguez, al M.I. Arnoldo Maeda y a todo el departamento de Ingeniería Mecánica.

También agradezco a la Controladora MABE, especialmente al M.C. Luis Ballesteros por el apoyo brindado y la oportunidad de desempeñarme y desarrollarme tanto como persona, como profesionista.

Agradezco a mis asesores de tesis y mentores M.I. Víctor Miranda y al M.C. Eleazar Álvarez, por la constante guía y trabajo en el desarrollo del proyecto de donde se originó el presente trabajo.

Agradezco a los ingenieros Alexis García, Jaime Serna, Roberto Capetillo y Bryan Navarro por su crucial trabajo, apoyo y guía en el desarrollo del proyecto donde se realizó la presente tesis.

Agradezco a los ingenieros César Gutierrez, Carolina Trejo, Jorge Vega y Arturo Lona, al comité del programa de desarrollo de ingenieros globales (GEDP) y sus integrantes por la asesoría, y ayuda a mi crecimiento personal y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIAS	1
AGRADECIMIENTOS	2
<i>TABLA DE CONTENIDO</i>	3
NOMENCLATURA	7
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO I MARCO DE REFERENCIA	11
1.1. Antecedentes	11
1.1.1. Secadoras de ropa	11
1.1.2. Análisis de revisión de patentes de sistemas de secado	14
1.1.3. Trabajos previos	15
1.1.4. Factor de energía combinado.....	16
1.2. Planteamiento del problema	17
1.3. Justificación	18
1.4. Hipótesis	18
1.5. Objetivos	19
1.5.1. Objetivo general	19
1.5.2. Objetivos específicos.....	19
1.6. Alcances y limitaciones	20
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	21
2.1. Estado del arte	21
2.2. Combustibles	25

2.2.1.	Gas natural.....	25
2.3.	Combustión y estequiometría	25
2.3.1.	Composición del aire	27
2.3.2.	Reacciones químicas y la combustión en metano.....	28
2.4.	Cinética química	31
2.4.1.	Ecuación de Arrhenius	31
2.5.	Quemadores	34
2.6.	Emisiones en la combustión	37
2.6.1.	Óxidos de nitrógeno	37
2.6.2.	Hollín	38
2.6.3.	Monóxido de carbono	38
2.6.4.	Dióxido de carbono	38
2.6.5.	Efectos indeseables de los quemadores	38
2.6.6.	Estabilidad de la flama	40
2.7.	Ecuaciones de gobierno de flujo de fluidos.....	41
2.7.1.	Modelos de turbulencia de dos ecuaciones.....	41
2.7.2.	Ecuación de especies.....	43
2.7.3.	Modelos de combustión.....	43
2.8.	Solución de ecuaciones de gobierno de flujo de fluidos	44
2.8.1.	Principio del CFD para solución de ecuaciones	44
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DESARROLLO		46
3.1.	Definición	47
3.1.1.	Diagrama de parámetros.....	47
3.1.2.	Diagrama de bloques funcionales	48

3.1.3.	AMEF	49
3.1.4.	Diseño de experimentos.....	50
3.2.	Medición.....	57
3.2.1.	Modelación numérica de línea base y diseño de experimentos	58
3.2.2.	Mediciones experimentales	74
3.3.	Análisis.....	79
3.4.	Diseño.....	80
3.5.	Optimización	80
3.5.1.	Exploración del modelo de simulación con fenómenos añadidos	80
3.6.	Validación	92
CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		93
4.1.	Resultados del diseño de experimentos	93
4.1.1.	Selección de concepto con base a resultados numéricos	93
4.1.2.	Selección de concepto con base a resultados experimentales	96
4.1.3.	Concepto final de diseño	98
4.2.	Condiciones de diseño que mejoran el desempeño del producto.....	99
4.2.1.	Flujo de mezcla	99
4.2.2.	Temperatura.....	101
4.3.	Resultados del modelo avanzado de simulación	103
4.3.1.	Velocidad.....	103
4.3.2.	Cámara de secado	104
4.3.3.	Sistema de combustión	105
4.3.4.	Perfil de temperaturas	106
4.3.5.	Difusor	107

4.4.	Mediciones experimentales.....	108
4.4.1.	Mediciones de temperatura	109
4.4.2.	Medición de emisiones	110
4.5.	Correlación del modelo optimizado de simulación	110
4.5.1.	Correlación de temperaturas	110
4.5.2.	Correlación de emisiones	111
CONCLUSIONES.....		112
REFERENCIAS.....		114
ANEXO A: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....		119
ANEXO B: ANALISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE SISTEMA DE GAS.....		120
ANEXO C: RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS		121

NOMENCLATURA

Variable	Descripción	Unidad
A	factor pre-exponencial	—
E	Energía	$M L^2 T^{-2}$
Ea	energía de activación	$M L^2 T^{-2}$
EA	exceso de aire	%
H	entalpía	$M L^2 T^{-2} Mol^{-1}$
k	Energía cinética turbulenta por unidad de masa	$L^2 T^{-2}$
K_c	constante cinética	—
M	Unidad de masa	—
$\dot{m}$	flujo másico	$M T^{-1}$
P	Presión	$M L^{-1} T^{-2}$
R	Tasa de reacción	—
Ru	Constante de gas ideal	$L^2 T^{-2} \theta^{-2}$
T	Temperatura	θ
t	Tiempo	T
U	Vector velocidad	$L T^{-1}$
X_k	Fracción molar	—
Y_k	Fracción de masa	—

β	Constante de tasa ajustada	—
Γ	Difusividad	$M L^{-1} T^{-1}$
ε	Tasa de disipación turbulenta	$L^2 T^{-3}$
θ	Unidad de temperatura	—
λ	Conductividad térmica	$M L T^{-3} \theta^{-1}$
ρ	densidad	$M L^{-3}$

RESUMEN

En este trabajo se planteó y realizó la modelación numérica del proceso de combustión por medio de un diseño de experimentos 3^3 para una secadora de ropa a gas natural teniendo los siguientes componentes de interés: tres quemadores, el mismo número de cámaras de combustión y ductos de transición. Las variables de salida fueron: temperatura y forma de flama, la temperatura de entrada de la cámara de secado y su distribución. El modelo CFD se realizó a partir de un modelo 3D simplificado de una secadora de gas MABE. Se consideraron los siguientes modelos: “Eddy dissipation & finite rate chemistry” para combustión y “k- ϵ ” para la turbulencia. Se consideró una cámara de secado estática, superficies adiabáticas, flujo sin radiación y estado estable.

De las 27 corridas, 7 mostraron un mejor comportamiento que la línea base, registrándose mayores temperaturas en la flama y a la entrada de la cámara de secado. Con esto se justifica la mejora del desempeño con la inversión que implicaría el cambio. Las 7 combinaciones se evaluaron experimentalmente mediante el procedimiento de pruebas de ingeniería de GE conocida como “drum Inlet”, junto con la línea base para seleccionar la mejor combinación.

Para la mejor combinación se encontró, de manera experimental, un incremento de temperatura a la entrada de la cámara de secado de 24°C utilizando la misma cantidad de combustible. El modelo de simulación se validó como herramienta de diseño y de toma de decisiones debido a la coincidencia de mejora en incremento de temperatura en las combinaciones predichas.

Finalmente se buscó mejorar el modelo de simulación de la secadora de gas añadiendo fenómenos adicionales como rotación en la cámara de secado y conducción en el sistema de combustión. Con ello se encontró una correlación cualitativa en cuestión de comportamiento del flujo de fluidos y perfil de temperaturas en componentes. Sin embargo, comparando temperaturas numéricas y experimentales, se reportó una diferencia promedio de temperaturas en la entrada de la cámara de secado de 104°C.

INTRODUCCIÓN

Las herramientas CAE toman cada vez más relevancia en el diseño en todo tipo de industrias, incluyendo la industria de electrodomésticos. Un ejemplo en dicha industria es la secadora de ropa a gas, en ella se pueden modelar análisis estructurales, modales, dinámicos, térmicos, químicos y de flujo de fluidos. La secadora de ropa de gas realiza su función primordialmente por la generación de un flujo de gases de combustión a altas temperaturas, el cual es llevado a la cámara de secado. Esta labor debe ser capaz de mantener una gestión de flujo eficiente a temperaturas adecuadas, con el cumplimiento de numerosas características que aseguren desempeño, seguridad y confiabilidad para que el usuario pueda operar su electrodoméstico de manera adecuada; la norma ANSI Z21.5.1 garantiza este propósito. Utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD), se estudia el comportamiento del proceso combustión y flujo de la mezcla de gases en la secadora de gas, con la finalidad de predecir su comportamiento químico y térmico con el fin de optimizarlo.

El sistema de combustión de la secadora de ropa tiene un nivel de complejidad alto, ya que el comportamiento de la flama es altamente dinámico, es improbable encontrar dos instantes de tiempo donde la flama se vea igual. Añadiendo que, se debe asegurar que la trayectoria del flujo de la mezcla coincida con el posicionamiento del sistema de encendido. El sistema de combustión depende principalmente en la distribución de la mezcla aire y combustible dentro del quemador, cámara de combustión y ducto de transición.

Un flujo pobre de aire significa una combustión pobre, con productos nocivos como el dióxido de carbono; y un flujo de aire muy rico puede significar bajas temperaturas de los gases de combustión, lo que conlleva a un bajo desempeño y mayor tiempo de secado de los textiles. Una cantidad equilibrada de aire y combustible es necesaria para tener un funcionamiento seguro y eficiente en la secadora de gas, buscando un secado rápido sin dañar los textiles.

El presente trabajo surgió a partir una la necesidad de una mejora energética debido a regulaciones medioambientales, el cual, se explican en el capítulo I.

CAPÍTULO I MARCO DE REFERENCIA

1.1. Antecedentes

Las secadoras de ropa son electrodomésticos ampliamente utilizados en los hogares a lo largo del mundo. Esto debido a la necesidad de remover la humedad de textiles, tales como: prendas de vestir, toallas y ropa de cama. A continuación, se describe el funcionamiento de los primeros modelos documentados, al igual que el funcionamiento de una secadora de gas actual en la que se desarrolla la presente tesis.

1.1.1. Secadoras de ropa

Las documentaciones más antiguas respecto a secado de ropa datan a principios del siglo XIX, en Francia. El funcionamiento de las primeras secadoras consistía en una cámara de secado (tambor rotatorio) de metal con agujeros que giraba sobre una fuente de calor, por medio de una manivela. Este tenía un alto riesgo de quemaduras e impregnación de olor a hollín en la ropa. En años posteriores se sustituyó la manivela por un motor de vapor o de gasolina. En el año 1915, se cambió por un motor eléctrico [1]. En la Figura 1.1., se muestra un diagrama del funcionamiento de una secadora de ropa.

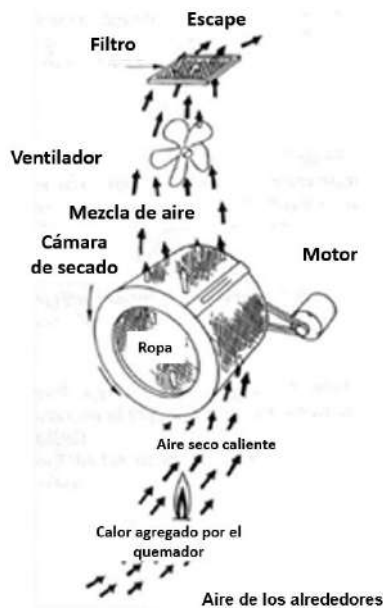


Figura 1.1. Funcionamiento de una secadora de gas [2].

Actualmente, el proceso de secado no ha cambiado mucho ya que sigue ocupándose una fuente de energía, ya sea eléctrica o de un combustible, para calentar aire seco que pasa por la cámara de secado, y así llevarse la humedad de la ropa. El proceso de combustión en el sistema de gas de las secadoras de ropa, se divide en tres fenómenos, el cual se describen a continuación (ver Figura 1.2.):

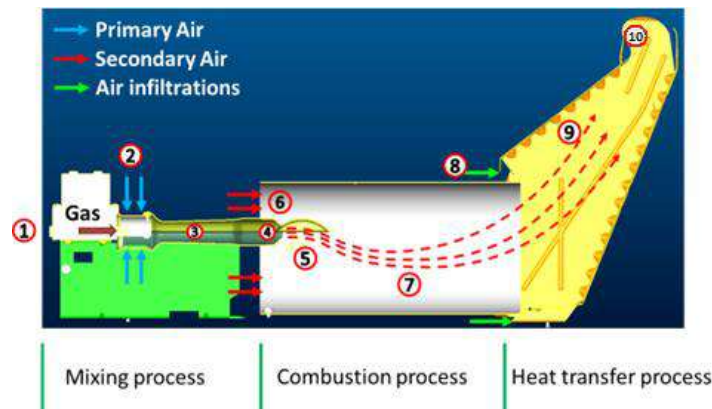


Figura 1.2. funcionamiento de modelo actual de una secadora de ropa MABE.

1. proceso de mezcla: en esta fase, por acción de la succión de un ventilador de la secadora y el arrastre generado por un flujo de gas a la salida de una esprea y un efecto Venturi, entra un flujo de aire y combustible al quemador. Ahí, la mezcla aire combustible busca homogeneizarse para que, a la salida, exista una reacción química lo más completa posible.

2. proceso de combustión: en esta fase, la mezcla aire combustible se hace reaccionar dentro de una cámara de combustión, por medio de un cuerpo cerámico a alta temperatura y una entrada de aire adicional, liberando calor, dióxido de carbono (idealmente) y agua. La flama generada por la reacción química se desarrolla en esta etapa.

3. Proceso de transferencia de calor: aquí la mezcla de gases calientes se combina con una entrada de aire secundario para homogeneizar la temperatura de la mezcla, esta fase se desarrolla en el ducto de transición, componente que envía los gases calientes a la entrada de la cámara de secado para remover humedad.

En la Figura 1.2., se muestra el proceso de acondicionamiento de los productos de combustión a la entrada de la cámara de secado para el proceso de deshidratación de ropa. Los pasos son los siguientes:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Salida del gas desde la esprea | 6. Entrada aire secundario |
| 2. Entrada de aire primario | 7. Combustión completa con el aire secundario |
| 3. Efecto Venturi | 8. Infiltración de aire adicional |
| 4. Salida de la mezcla del quemador | 9. Salida al deflector de flama |
| 5. Ignición | 10. Aire caliente para secado |

En una secadora de producción actual, el sistema de combustión se muestra en la Figura 1.3., donde se encuentra el quemador (1), cámara de combustión (2) y ducto de transición (3).

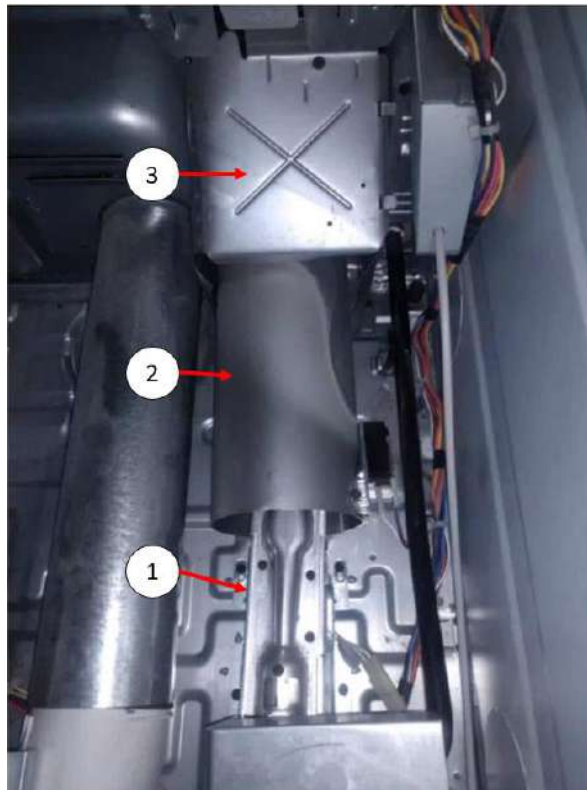


Figura 1.3. sistema de combustión de una secadora MABE (vista superior).

Cada equipo de ingeniería perteneciente a diferentes industrias ha innovado en diferentes diseños de sistema de secado. En la siguiente sección, se muestran algunos sistemas de secado con componentes diferentes, patentados por diferentes compañías:

1.1.2. Análisis de revisión de patentes de sistemas de secado

En la actualidad, existen innumerables diseños de sistemas de combustión para el secado de la ropa, todos con componentes similares. A continuación, en la Figura 1.4. se muestran algunas patentes representativas de componentes del sistema de combustión de secadoras de ropa, ninguna de ellas impacta en el concepto a estudiar:

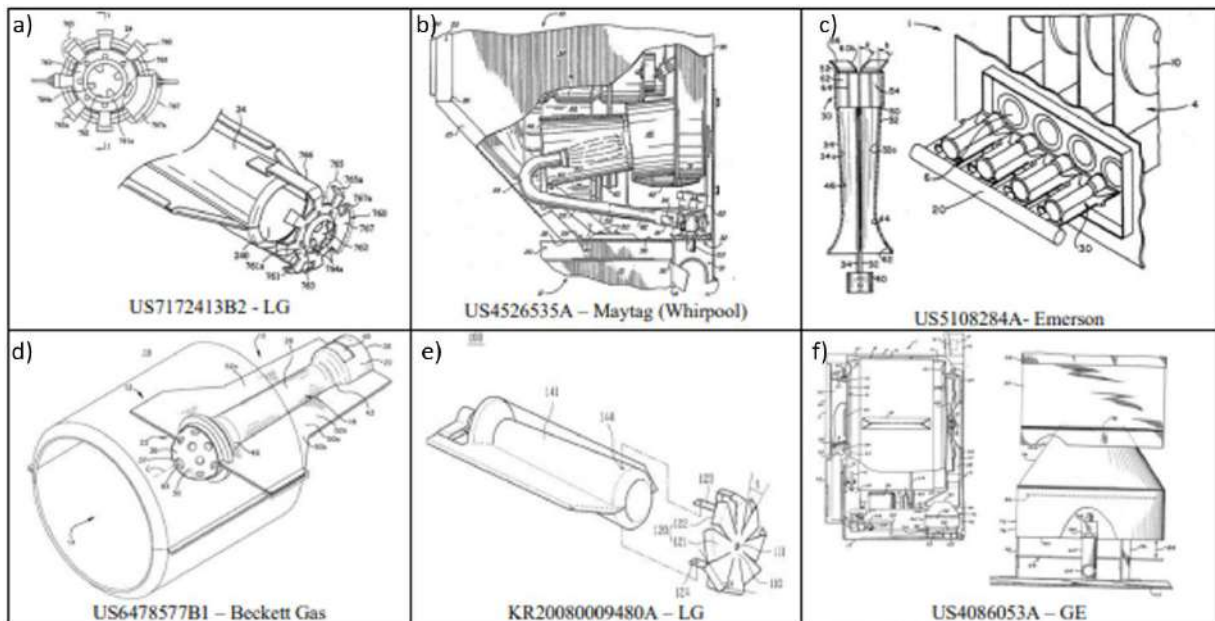


Figura 1.4. Análisis de revisión de patentes de sistemas de secado

- a) Patente US7172413B2 (LG): Se muestra su modelo de quemador curvado con un aparato añadido para bifurcar las flamas y así disminuir la longitud de flama y mejorar la mezcla aire combustible.
- b) Patente US4526535A (Maytag): consiste en un quemador ubicado dentro de un compartimento dentro de un gabinete. Este sistema tiene la ventaja de ser más compacto, pero con una capacidad de mezcla pobre.

- c) US5108284A (Emerson): Consiste en una serie de quemadores Venturi diseñados para ser más resistentes a retroceso y separación. Se utiliza para hornos y sistemas de secado.
- d) US6478577B1 (Becket Gas): Quemador con cabeza esférica con múltiples portas. La distribución de porta mejora la reacción aire combustible y flamas más cortas.
- e) KR20080009480A (LG): Consiste en una geometría con forma de rehilete que redirecciona las flamas de tal manera, que forman una espiral a lo largo de la cámara de combustión. Esta patente está diseñada para disminuir el uso de combustible.
- f) US4086053A (GE): Consiste en una lámina para que choque la flama. Cuenta con una cámara de combustión cónica para mejorar la mezcla con aire secundario y velocidad de flujo.

1.1.3. Trabajos previos

Urbiola et al (2012) en su trabajo “diseño de un quemador de gas para mejora del desempeño energético de una secadora de ropa”, presentaron un estudio extenso de posibles mejoras para el sistema de combustión de las secadoras de gas MABE. Utilizando herramientas de CFD se probaron varias propuestas de diseño y se realizó una comparación en desempeño en el sistema. Algunas propuestas de diseño exploradas en la presente tesis se derivaron de dicho trabajo.

Zapatero (2018), mediante su tesis “Modelación, simulación y validación de los fenómenos de mezcla, combustión y transferencia de calor en el sistema de gas de una secadora de ropa”, realiza un acercamiento a las primeras simulaciones del sistema de combustión de las secadoras de ropa en Mabe y métodos de validación, como la velocimetría de partículas (PIV) [3]. Su trabajo consistió en hacer un modelo de simulación limitándose al quemador, cámara de combustión y ducto de transición, rodeado en un volumen de control. Su trabajo funcionó como un acercamiento al mejor entendimiento del comportamiento y distribución de flujo en el sistema de combustión.

En la Figura 1.5., se muestra el perfil de velocidad del quemador de las secadoras de ropa a gas según el modelo de su investigación:

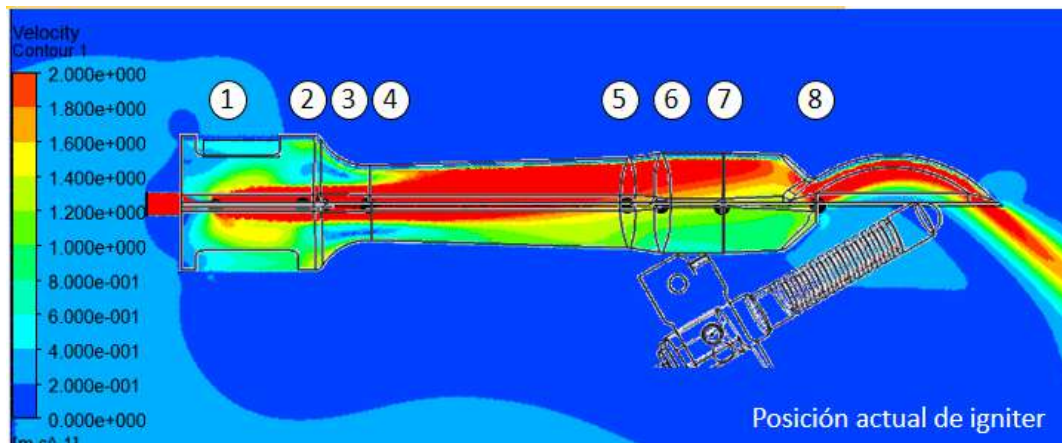


Figura 1.5. perfil de velocidad del modelo del quemador de secadoras de ropa MABE [3]

Ambos estudios se utilizaron como base para el presente proyecto, que busca incrementar la eficiencia del sistema de combustión de la secadora de ropa, mejorando el factor de energía combinado (CEF). La definición del factor de energía combinado se muestra a continuación.

1.1.4. Factor de energía combinado

El factor de energía combinado (CEF) es un coeficiente utilizado por la asociación de fabricantes de electrodomésticos (AHAM) y por la agencia estadounidense de protección ambiental Energy Star, para relacionar la energía total utilizada por carga de ropa. Este coeficiente se calcula mediante la ecuación 1.1. [4]:

$$CEF = \frac{C(lb)}{(E_{on} + E_{stand by})(kWh)} \quad (1.1)$$

Donde:

- C es la carga de ropa, 8.45 libras para secadoras estándar y 3 libras para secadoras compactas
- E_{on} es la energía utilizada por la secadora cuando está encendida
- $E_{stand by}$ es la energía utilizada por la secadora en modo de espera

Debido a que estas mediciones son reguladas para el mercado estadounidense, la carga de ropa se mide en libras; el consumo energético, al considerar energía eléctrica y química, se mide en kWh. Mientras mayor sea el CEF, más eficiente es la secadora de ropa.



Figura 1.6. Logotipo Energy Star [4].

1.2. Planteamiento del problema

A mediados del año 2022, el departamento de energía de las oficinas de eficiencia energética y energías renovables de los Estados Unidos comunicó un programa de estandarización de conservación de energía (RIN 1904-AD99). Este programa prescribe un ajuste en estándares para varios productos comerciales e industriales que funcionen a base de combustible, esto incluyendo las secadoras de ropa. Dicha norma establece un incremento del factor de energía combinado en las secadoras de ropa comercializadas en Estados Unidos de por lo menos de un 5.45%. Es decir, del factor actual 3.30 lb/kWh a 3.48 lb/kWh. Sin embargo, para tener una mayor certeza que las secadoras cumplan con esta regulación, MABE y GE acordaron que se debe alcanzar un Factor de Energía Combinado (CEF) con un 15% más alto, es decir de 3.8 lb/kWh. El departamento de energía pide que esa norma sea cumplida para el año 2026.

El sistema de gas de las secadoras de ropa MABE en su construcción actual, no tiene la capacidad para satisfacer las regulaciones estipuladas para el 2026 (únicamente en desempeño), por lo que este se debe rediseñar. Este rediseño debe mantener un desempeño seguro, cumpliendo como hoy en día las normas de seguridad establecidas para las secadoras de ropa, como la ANSI Z21.5.1 [5]. Esta norma debe aplicarse para sistemas que operen con gas natural, propano, butano y butano-aire.

1.3. Justificación

La empresa de electrodomésticos mexicana MABE identificó el ajuste regulatorio como un área de oportunidad en el sistema de combustión (quemador, cámara de combustión y ducto de transición) de las secadoras de ropa. De manera que este se debe rediseñar para que sea un 15% más eficiente. El sistema de gas de las secadoras MABE tiene más de 20 años sin cambios en el diseño, a excepción de piezas añadidas al quemador base, para el cumplimiento normativo y de desempeño añadidos a lo largo de los años. El rediseño busca satisfacer la regulación, además de retirar componentes que pueden ser integrados y minimizar el costo añadido en componentes, además de incrementar los modos de falla del sistema.

De no satisfacerse la regulación para el año 2026, no se le permitirá a MABE comercializar las secadoras de ropa de gas en Estados Unidos, el cual representa el 20% del volumen de ventas a nivel global en electrodomésticos de secado de ropa.

Según la regla RIN 1904-AD99, esta regulación impactará de manera positiva en el ambiente. Se prevé que para el año 2056, en Estados Unidos se evitarán 116 millones de toneladas de dióxido de carbono, 42.6 miles de toneladas de dióxido de azufre, 181 mil toneladas de óxidos de nitrógeno, 883 mil toneladas de metano, 1.09 mil toneladas de óxido nítrico y 0.26 toneladas de mercurio; además de ahorrar 3.281 Exajoules de energía (es decir 3.11 quads) [6].

1.4. Hipótesis

Las siguientes hipótesis son en base al conocimiento teórico y conocimiento del producto por parte de los participantes.

Aproximando la relación aire combustible de la mezcla a la relación estequiométrica incrementará la temperatura de flama, y, por consiguiente, la temperatura de entrada del tambor; implicando que, con un menor flujo de combustible, se pueden igualar las condiciones de temperatura iniciales.

Usando un modelo numérico se identificarán las siguientes variables: calidad de la flama (largo), la relación aire combustible y el flujo de la mezcla a la salida de la porta.

Se espera que de todas las combinaciones del diseño de experimentos se encuentre una mejora en dichas variables, se incremente la generación de calor, y, en consecuencia, crezca el factor de energía combinado (CEF).

A través de la metodología de 6 sigma DMADOV, se plantea un diseño de experimentos 3^3 ejecutado por simulación numérica de volumen finito, en conjunto con su análisis, de este se seleccionará una mejor propuesta de diseño en términos de las variables descritas anteriormente. El resultado se espera que satisfaga las regulaciones impuestas por el departamento de energía.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Seleccionar por medio de simulación CFD la mejor combinación de un diseño de experimentos 3^3 , teniendo como variables a considerar la temperatura (flama adiabática, entrada de la cámara de secado y distribución) y emisiones de monóxido de carbono y dióxido de carbono. Además de mejorar el modelo de simulación añadiendo fenómenos como lo son conducción y rotación en la cámara de secado.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar las siguientes variables: productos, reactantes, temperatura de flama adiabática y de entrada de la cámara de secado y longitud de flama, todo mediante simulación con ANSYS CFX
- Validar la simulación con un porcentaje de correlación con mediciones experimentales.
- Plantear y analizar un diseño de experimentos DOE de 3^3 con el quemador, cámara de combustión y ducto de transición, mediante simulación CFD.
- Comparar resultados para seleccionar la mejor combinación de componentes.
- Mejorar el modelo de simulación de acuerdo con los fenómenos asociados
- Identificar áreas de oportunidad en el modelo de simulación para trabajos futuros

1.6. Alcances y limitaciones

El diseño de experimentos 3^3 (DOE) se lleva a cabo vía simulación CFD para descartar combinaciones que presenten problemas de combustión (desprendimiento, retroceso o puntas amarillas). Además, dentro del modelo numérico se monitorean puntos de interés en el trayecto de los productos de combustión dentro de la secadora de ropa para evaluar las siguientes variables: temperatura de flama y temperatura media y distribución en la entrada de la cámara de secado. El alcance será seleccionar las mejores dos combinaciones del diseño de experimentos, para que en trabajos futuros puedan ser evaluadas, con la finalidad de asegurar que cumplan con los requerimientos de energía, seguridad, desempeño y confiabilidad.

En la presente tesis se estudian dos modelos de simulación: uno simplificado, derivado de la base de datos de MABE; y otro avanzado, donde se le añaden adecuaciones a la geometría para emular el efecto de la rotación de la cámara de secado en el flujo de aire. El modelo simplificado se utiliza para el diseño de experimentos, mientras que el avanzado se presenta como una exploración de mejora.

En ambos modelos de simulación, tanto al del diseño de experimentos, como al avanzado, se contemplan un porcentaje de error asociado a varios factores, tales como: las limitaciones de capacidad del equipo de cómputo asignado (densidad de malla, número de elementos, simplificación y ausencia de fenómenos y reacciones y tiempo de iteración). En ambos modelos no se considera la generación de hollín ni de óxidos de nitrógeno, esto debido a que se requiere más investigación para ser implementación. Se espera poder ser implementado en trabajos futuros.

Al modelo avanzado de simulación de la secadora de ropa, se consideran dos fenómenos adicionales: rotación de la cámara de secado y conducción en componentes relevantes (quemador, cámara de combustión, ducto de transición, difusor de gas y lámina difusora). No se considera radiación.

Todo trabajo realizado en la presente tesis (diseño de experimentos y el modelo avanzado de simulación) se realizó considerando únicamente gas natural (metano).

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte

Andreini (2014) presenta un análisis CFD en el software ANSYS CFX para predecir emisiones de óxidos de nitrógeno en un quemador de premezcla para una turbina de gas de alta resistencia. El estudio se realizó principalmente estudiando el proceso de premezcla del quemador, utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS). Los perfiles obtenidos en puntos estratégicos de la prueba se compararon con mediciones experimentales en un banco de pruebas, midiendo los óxidos de nitrógeno en el escape. La correlación numérica se considera aceptable, pudiéndose utilizar en parámetros y condiciones operativas diferentes. Posteriormente se utilizó el modelo obtenido para explorar diferentes formas de inyección de combustible para minimizar la generación de óxidos de nitrógeno. Los resultados obtenidos permitieron generar configuraciones avanzadas que en trabajos futuros se esperan ser probadas [7].

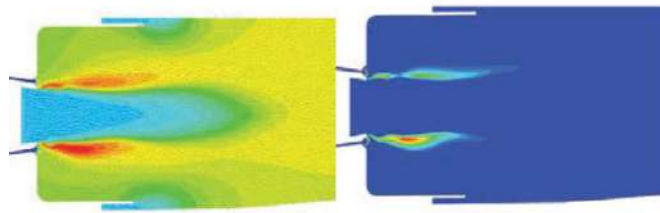


Figura 2.1. Perfil de temperaturas (izquierda) y emisiones de NOx (derecha) de análisis CFD de quemador de premezcla para turbina de gas [7]

Pichler y Wesenauer presentan una investigación respecto a las reacciones químicas de la combustión y el rendimiento del inyector de gas de un modelo de quemador. En la investigación se presenta una comparación entre un análisis 1D y 2D por medio de CFD. El análisis 1D mostró buena correlación con el análisis 2D en una simulación no reactiva y a su vez, con mediciones experimentales. Sin embargo, no hubo correlación en el análisis considerando reacciones [8].

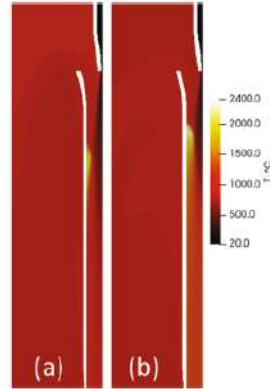


Figura 2.2. Perfil de temperaturas de un eyector con una temperatura inicial de 900°C con diferentes mecanismos de reacción [8]

El trabajo de Namkhat y Jugjai muestra una investigación de entradas de aire de un quemador autoaspirable, realizando pruebas en caliente y en frío. El estudio abarca mediciones de entrada de aire por medio de un sensor de oxígeno y velocimetría de partículas. Las mediciones se compararon con ecuaciones con base a los principios de energía y momentum. Se llegó a la conclusión que los parámetros clave del sistema que afectan el porcentaje de aire primario son el flujo másico del gas, tipo de combustible, geometría de la esprea, geometría del tubo de mezcla y la geometría de la porta [9].

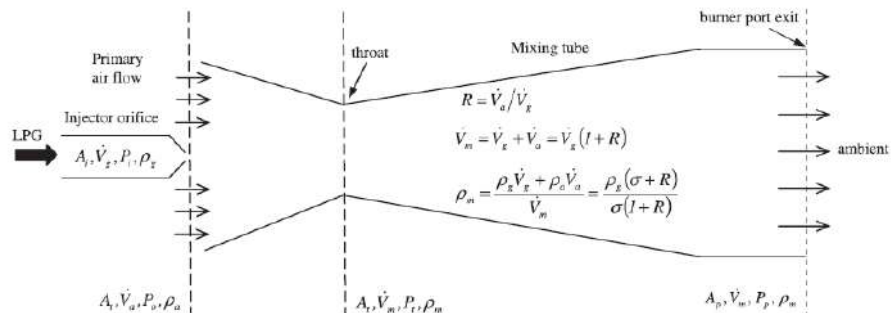


Figura 2.3. Entrada de aire de un quemador auto aspirable [9]

Boukhalfa, en su artículo modelado de cinética química de la combustión del metano (Chemical Kinetic Modeling of Methane Combustion) se desarrolló un modelo matemático cinético de reacción química incluyendo 213 reacciones elementales y 48 especies. El modelo se realizó por medio de Fortran, en el método numérico Runge-

Kutta de cuarto orden. La predicción de porcentaje de agua y dióxido de carbono se mostró aceptable, sin embargo, el óxido de nitrógeno presentó un valor menor al que se midió [10].

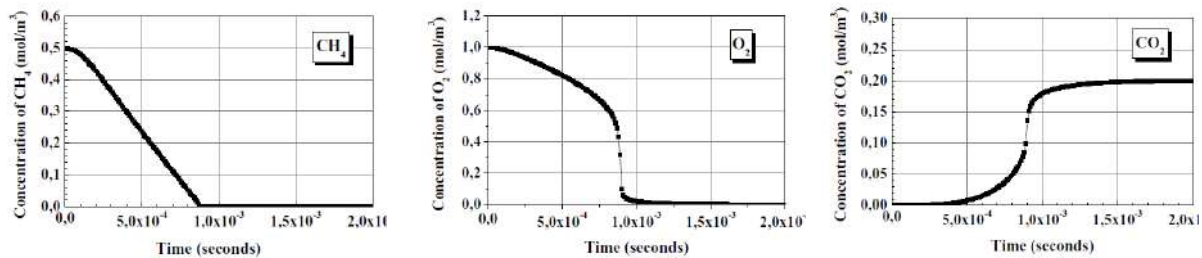


Figura 2.4. Predicción de emisiones de metano, oxígeno y dióxido de carbono [10]

Agudelo y Salinas presentan un estudio teórico práctico sobre el diseño y comportamiento de los quemadores de premezcla con efecto inductor. Realizando un análisis dimensional, se propone un modelo de diseño en el quemador. Se encontraron relaciones geométricas para dimensionar el quemador para mejorar la eficiencia. El estudio demuestra la importancia de la longitud de la garganta del quemador, además del ángulo de difusión. La información recabada del estudio ayuda a entender la razón de mejora de un quemador a otro [11].



Figura 2.5. Diagrama de comportamiento de un quemador de premezcla [11]

Thompson et al, muestra un caso de estudio de optimización de un quemador Venturi por medio de CFD utilizando ANSYS FLUENT. Se consideraron 4 variantes de diseño del quemador. Por medio de algoritmos de optimización se realizó una propuesta de rediseño del quemador, reportando un incremento del 30% en la eficiencia de mezclado en el quemador. [12]

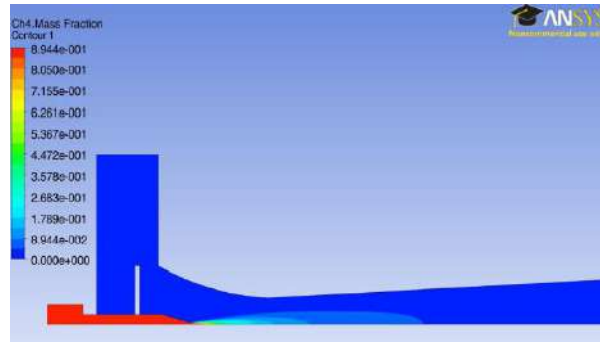


Figura 2.6. Fracción de masa de metano en caso de estudio de quemador Venturi [12]

Ream, en su tesis “mecanismo de reacción de orden reducido de la combustión del metano-aire que satisface la desigualdad del diferencial de entropía” (creating reduced order methane-air combustion mechanisms that satisfy the differential entropy inequality) presenta un estudio de los mecanismos de reacción del metano en el proceso de combustión que satisfacen la segunda ley de la termodinámica. Su trabajo consiste en un método para determinar los parámetros de Arrhenius para poder alimentar los parámetros de combustión en la simulación. La información presentada se utilizó para alimentar el modelo de combustión de la secadora de gas [13].

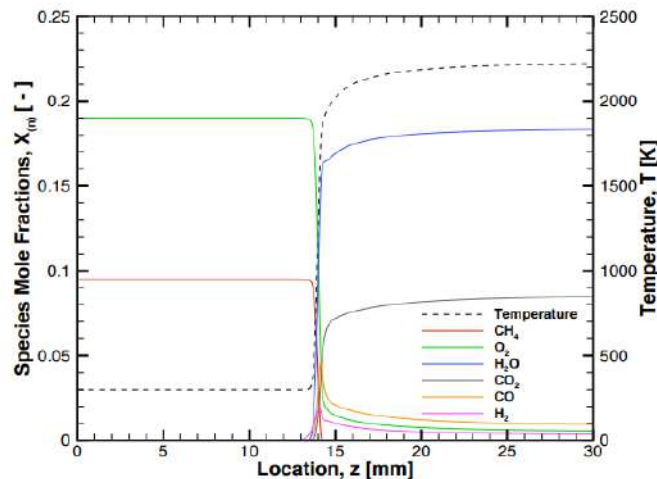


Figura 2.7. Resultados de simulación unidimensional de combustión estequiométrica de metano-aire a presión atmosférica [13]

Como preparación para abordar la necesidad de la empresa MABE respecto al consumo energético del producto se describen los siguientes fundamentos.

2.2. Combustibles

Cualquier material que libera energía al quemarse es considerado combustible. La mayoría de los combustibles están compuestos de carbono e hidrógeno (C_nH_m). Estos se conocen como hidrocarburos, y se encuentran en las 3 fases: Sólido (carbón), líquido (gasolina) y gaseoso (gas natural). Muchos combustibles en realidad son una mezcla de varios hidrocarburos diferentes, pero por simplicidad se considera como un solo hidrocarburo. Por ejemplo, el gas natural, que es una mezcla de aproximadamente 90% metano, 5% etano, entre otras sustancias, se considera como metano puro [14].

En las secadoras de ropa de gas a nivel mundial se utilizan principalmente los combustibles gas natural, propano, butano y butano-aire. Siendo el gas natural el material de trabajo.

2.2.1. Gas natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos, compuesta principalmente por metano (CH_4), puede contener también trazas de dióxido de carbono, nitrógeno, ácido sulfhídrico y agua.

Este gas puede obtenerse por dos formas, mediante refinación del petróleo y por depósitos que no contienen petróleo. Los mayores países productores de este gas son Estados Unidos y Rusia [15].

El gas natural tiene muchos usos en todos los sectores, por ejemplo: en el sector vehicular, se utiliza como fuente de energía para que los automóviles se desplacen; en los hogares y comercios, se usa para cocinar, calentar agua y secar ropa; y en la industria, se utiliza como sistema de calefacción, secado, generación de vapor para generar energía eléctrica y hornos [16].

2.3. Combustión y estequiometría

La combustión es un proceso químico donde un combustible se oxida, liberando altas cantidades de energía por acción de una fuente de calor que activa la reacción. El agente oxidante más utilizado es el aire, por cuestiones prácticas (se encuentra en todos lados y es gratis), el oxígeno puro solo se utiliza en procesos muy específicos,

como el corte y la soldadura. Esta reacción se puede describir mediante el triángulo de la combustión (ver Figura 2.8.)

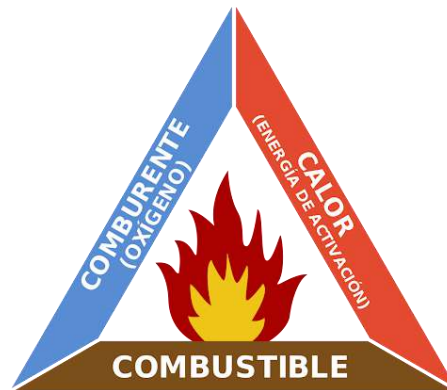


Figura 2.8. Triangulo de la combustión

Existen tres tipos de combustión, todos en función de la cantidad de aire. Los cuales son:

- Combustión estequiométrica o teórica: Es el caso ideal, el combustible reacciona con la cantidad mínima de aire, teniendo en los productos dióxido de carbono, agua y nitrógeno molecular. Este caso es altamente improbable en la vida real, ya que no todo el combustible tiene un contacto perfecto con el aire, generando combustiones incompletas.
- Combustión con exceso de aire: Se le administra una cantidad mayor de aire para asegurar una combustión completa. Esta es la práctica más común y conveniente para realizar una reacción química. En este caso, en la reacción química se forma dióxido de carbono, agua, nitrógeno y oxígeno molecular.
- Combustión con falta de aire: La cantidad de aire es menor a la combustión estequiométrica, por lo que se genera monóxido de carbono, esta combustión no es deseable, debido al desperdicio de combustible además que el monóxido de carbono es altamente tóxico para el ser humano.

2.3.1. Composición del aire

El aire seco está compuesto por oxígeno, nitrógeno, argón y dióxido de carbono, sin embargo, estas últimas dos se consideran despreciables, además de ser inertes al proceso de combustión. Por lo que, por simplicidad, el aire se considera una mezcla 21% de oxígeno molecular y 79% de nitrógeno molecular. En otras palabras, se puede decir que, por cada mol de oxígeno, existen $0.79/0.21 = 3.76$ moles de nitrógeno. Por ello:



El nitrógeno es una sustancia por lo general inerte, excepto en temperaturas muy altas, donde puede reaccionar con el oxígeno para generar óxidos de nitrógeno (NOx), lo cual no es deseable, debido a su alta toxicidad. Sin embargo, el nitrógeno juega un papel importante, ya que, al estar presente en la combustión, absorbe grandes cantidades de calor.

Humedad del aire en la combustión

El aire contiene también vapor de agua, y este suele ser inerte en la combustión, sin embargo, si la temperatura es muy alta, se puede descomponer en oxígeno e hidrógeno moleculares. Si el combustible tiene una cantidad de dióxido de azufre, se deben tomar medidas, ya que puede reaccionar con el agua y formar ácido sulfúrico, sin embargo, para propósitos de la presente tesis no es el caso, debido a que los combustibles utilizados no contienen dicho compuesto.

Condiciones de ignición

Los combustibles en condiciones normales no hacen reacción. Para que la combustión suceda, es necesario que el combustible supere una cierta temperatura, conocida como temperatura de ignición. Al llegar a dicha temperatura, se realiza la combustión. Para ello, se puede realizar una chispa friccionando dos materiales o incluso con corriente eléctrica. A continuación, se muestran las temperaturas de ignición de varias sustancias [17].

Tabla 2.1. Propiedades de diferentes combustibles gaseosos [18]

Combustible	Temperatura [°C]	Densidad [kg/m³]	Capacidad calorífica [mj/m³]
Gas natural (ch4)	482 - 692	0.668	37.7
Butano (c4h10)	405	2.489	121.79
Propano (c3h8)	493 – 603	1.882	93.94

2.3.2.Reacciones químicas y la combustión en metano

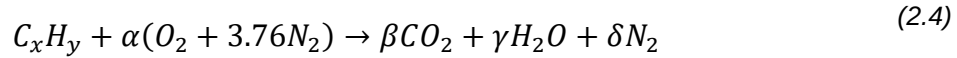
Para poder plantear un balance de energía para obtener la energía de combustión, se debe realizar primero un balance de masa. Es decir que la masa total de cada elemento se conserva durante una reacción química. Además, el número de átomos de cada elemento se conserva durante una ecuación química. Por otro lado, en el número de moles, no es el caso, los moles no se conservan en la reacción química.

La combustión en la realidad es un proceso altamente complejo. Algunos autores, como Vallabhuni et al. (2018), han modelado la combustión del metano hasta en 4000 reacciones químicas [19]. Para propósitos del documento, se simplificará a únicamente dos reacciones en cuestión de simulación, y una reacción en cuestión de entendimiento del concepto.

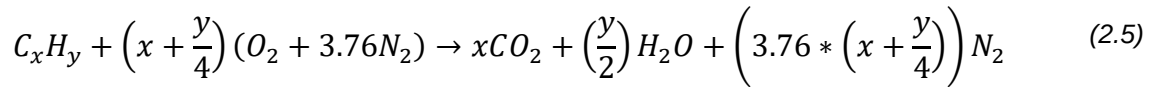
La primera reacción consiste en la mezcla del metano con oxígeno, generando agua y monóxido de carbono (ver ecuación 2.2.). Posteriormente, un medio mol de oxígeno reacciona con un mol de monóxido de carbono para generar un mol de dióxido de carbono (ver ecuación 2.3).



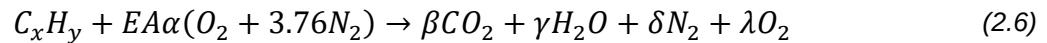
A su vez, se pueden unir ambas ecuaciones y saltar el paso del monóxido, considerando un combustible con aire se genera dióxido, agua y nitrógeno molecular. Una combustión estequiométrica se muestra de la siguiente manera:



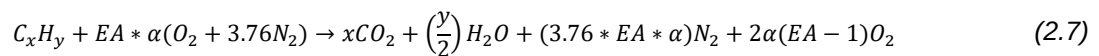
Como se mencionó anteriormente, al reaccionar con la cantidad teórica de aire, resulta en una mezcla de dióxido de carbono, agua y nitrógeno. En este caso no sale oxígeno molecular en la ecuación. Los valores de α , β , γ , y δ se pueden calcular mediante un balance químico.



Para una reacción con exceso de aire ($EA > 1$):

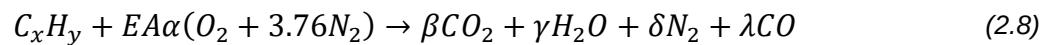


Se puede simplificar y unificar ambos casos de la reacción química en la siguiente ($EA \geq 1$):



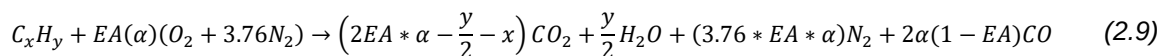
- Donde $\alpha = x + \left(\frac{y}{4}\right)$

Para una reacción con falta de aire ($EA < 1$):



Observando las ecuaciones 2.1. y 2.2., si no hay suficiente oxígeno el monóxido de carbono no tiene oxígeno para reaccionar, por lo que se conserva como monóxido.

La ecuación se reescribe de la siguiente manera:



Ya teniendo una ecuación general para el balance químico, se puede obtener la cantidad de masa de cada compuesto de los productos.

$$m = \#moles * M \quad (2.10)$$

Donde m es la masa de la sustancia (kg) y M es la masa molar de la sustancia (kg/kmol).

Relación aire combustible

La relación aire combustible es una razón que define cuántos kilogramos de aire se requieren para un kilogramo de combustible. Este se calcula dividiendo la masa de aire con la masa del combustible.

$$r_{a/c} = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (2.11)$$

Temperatura de flama adiabática

Se sabe que la cantidad de calor está directamente relacionado con la temperatura. Y que, en un proceso de combustión, el calor puede perderse en los alrededores o incrementar la temperatura de los reactivos. La temperatura de flama adiabática es la temperatura máxima que puede llegar una combustión, esta condición se cumple si no existen pérdidas de calor hacia los alrededores [14]. La temperatura de flama suele variar dependiendo de factores como la presión y temperatura inicial. A continuación, en la Tabla 2.2., se muestran temperaturas de flama adiabática en combustibles comunes, cuyos reactivos reaccionaron a una presión de 1 atmósfera, a temperatura de 20°C, con su cantidad estequiométrica de aire:

Tabla 2.2. Temperaturas de flama adiabática de combustibles comunes [20]

Combustible	Temperatura [K]
Metano	1950
Propano	1967

Gas natural	1960
Butano	1970

La temperatura de flama adiabática es un parámetro importante para el diseño de elementos que dependen de la combustión, como turbinas de gas, cámaras de combustión o secadoras. Por supuesto, la temperatura real suele ser menor, ya que no se consideran pérdidas de calor, combustión incompleta ni disociación. La temperatura depende de tres factores: el estado de los reactivos, el grado que se completa la reacción y el exceso de aire. La mayor temperatura de combustión sucede en el caso de una combustión estequiométrica.

2.4. Cinética química

Viendo la combustión de la secadora desde un punto de vista termodinámico nos dice a qué variables de estado llega la mezcla. No obstante, no nos responde a muchas preguntas importantes, tales como: ¿Cómo la mezcla llega desde su estado inicial a su estado final? Generalmente, la reacción de la combustión es mucho más rápida que otras reacciones químicas. También la velocidad de reacción depende de la temperatura. Esta información es importante para alimentar el modelo de simulación y buscar predecir las reacciones químicas de forma acertada [21].

2.4.1. Ecuación de Arrhenius

La ecuación de Arrhenius es una relación entre la constante de velocidad respecto a la temperatura que se realiza la reacción. La ecuación de Arrhenius se describe a continuación (ecuación 2.13.) [21]:

$$k = AT^{\beta} e^{-\frac{Ea}{R_u T}} \quad (2.13)$$

Donde:

- **k** es la constante cinética

- **A** es el factor pre-exponencial, este indica la frecuencia de las colisiones
- **Ea** es la energía de activación
- **R** es la constante de gas ideal
- **T** es la temperatura
- **β** es la constante de tasa ajustada

Los coeficientes de las reacciones están dados por la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Mecanismo optimizado de dos pasos del metano [13]

Reaction	Equation	A	β	E
1	$\text{CH}_4 + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	3.1623×10^{14}	0.8308	2.3855×10^4
2 _f	$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	4.2094×10^6	0.1251	7.3969×10^3
2 _b	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 0.5\text{O}_2$	1.4286×10^9	0.2851	1.7072×10^5

Units are cm, mol, cal, s, and K.

Reacción metano oxígeno

Las unidades de la tasa de reacción están determinadas por la siguiente ecuación

$$R = K * [\text{CH}_4]^{nM} * [\text{O}_2]^{nM}$$

Donde “nM” es el número de moles en la reacción. Tomando los valores de la ecuación 2.1.:

$$R = K * [\text{CH}_4]^1 * [\text{O}_2]^{1.5}$$

Se sabe que la velocidad de reacción son moles/s-m³, y los valores del metano y el oxígeno son moles/cm³.

$$[\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-3}] = K * [\text{mol m}^{-3}]^1 * [\text{mol m}^{-3}]^{1.5}$$

Los valores obtenidos están medidos en centímetros, moles, calorías y kelvin, por lo que se deben ajustar las unidades:

$$[\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-3}] = K * [\text{mol } (1 \times 10^2 \text{ cm})^{-3}]^1 * [\text{mol } (1 \times 10^2 \text{ cm})^{-3}]^{1.5}$$

$$[1 \times 10^6 \text{ mol s}^{-1} \text{ cm}^{-3}] = K * [1 \times 10^6 \text{ mol}^1 \text{ cm}^{-3}] * [1 \times 10^9 \text{ mol}^{1.5} \text{ cm}^{-4.5}]$$

Agrupando unidades:

$$K = 10^{-9} \frac{\text{cm}^{4.5}}{\text{s mol}^{1.5}}$$

Utilizando la ecuación de Arrhenius modificada:

$$K = A * T^{\beta} * e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}$$

Por lo que:

$$10^{-9} \frac{cm^{4.5}}{s \ mol^{1.5}} = A * T^{0.8308}$$

$$A = 10^{-9} cm^{4.5} s^{-1} mol^{-1.5}$$

Los términos en el exponente se eliminan, por lo que es un término adimensional

$$A = 3.1623 \times 10^{14} * 1 \times 10^{-9} [mol^{-1.5} s^{-1} cm^{4.5} K^{-0.8308}]$$

Convirtiendo a metros:

$$A = 3.1623 \times 10^{14} [mol^{-1.5} s^{-1} m^{4.5} K^{-0.8308}]$$

Reacción monóxido de carbono oxígeno hacia delante

$$R = K * [CO]^1 * [O_2]^{0.5}$$

$$[mol \ s^{-1} m^{-3}] = K * [1 \times 10^{-6} \ mol^1 \ m^{-3}] * [1 \times 10^{-6} \ mol^{0.5} \ m^{-1.5}]$$

$$\left[\frac{mol}{mol^{1.5}} s^{-1} \frac{m^{-3}}{m^{-4.5}} \right] = K * 1 \times 10^{-6}$$

$$A = 4.2094 \times 10^6 * 1 \times 10^{-6} [mol^{-0.5} s^{-1} m^{1.5} K^{-0.1251}]$$

$$A = 4.2094 [mol^{-0.5} s^{-1} m^{1.5} K^{-0.1251}]$$

$$E = 7.4 \times 10^3 \left[\frac{cal}{mol} \right] * \left[\frac{4.184 J}{1 \ cal} \right] = 3.09 \times 10^4 \left[\frac{J}{mol} \right]$$

Reacción monóxido de carbono oxígeno hacia atrás

$$R = K * [CO_2]^1$$

$$[mol \ s^{-1} m^{-3}] = K * [1 \times 10^{-6} \ mol^1 \ m^{-3}]$$

$$\left[\frac{mol}{mol} s^{-1} \frac{m^{-3}}{m^{-3}} \right] = K * 1 \times 10^{-6}$$

$$A = 1.4286 \times 10^3 [s^{-1} K^{-0.2851}]$$

$$E = 1.71 \times 10^5 \left[\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right] * \left[\frac{4.184 \text{ J}}{1 \text{ cal}} \right] = 7.14 \times 10^5 \left[\frac{\text{J}}{\text{mol}} \right]$$

2.5. Quemadores

El quemador es un elemento diseñado para llevar a cabo la combustión de manera controlada. El quemador tiene la funcionalidad de mezclar el aire y el combustible, además de asegurar la velocidad correcta de la mezcla y pueda ser quemada de forma correcta [22]. Existen varios tipos de quemadores, sin embargo, para propósitos de la tesis, se hablará principalmente de los quemadores de premezcla

Quemadores de premezcla

Los quemadores de premezcla son aquellos diseñados para realizar una mezcla aire combustible dentro de sí mismos, para ser quemados a su salida. Algunos de este tipo pueden ser [22]:

Mezclador de inducción

Aquí la energía de un fluido aspira al otro, generalmente por un inyector o un tubo Venturi. Este es el más utilizado, y se distinguen diferentes tipos:

Mezcladores de inducción atmosférica

El gas suele estar a una presión atmosférica o mayor, y es el fluido inductor que aspira el aire (ver Figura 2.9).

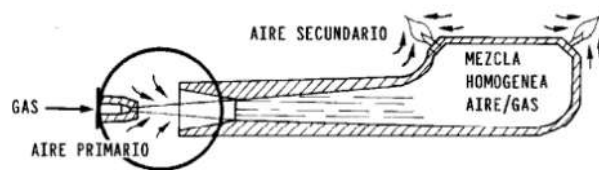


Figura 2.9. Mezclador de inducción atmosférica [3].

Mezcladores de aire inductor o gas despresurizado

El aire comprimido aspira el gas, que está despresurizado o reducido a presión atmosférica. Se muestra en la Figura 2.10

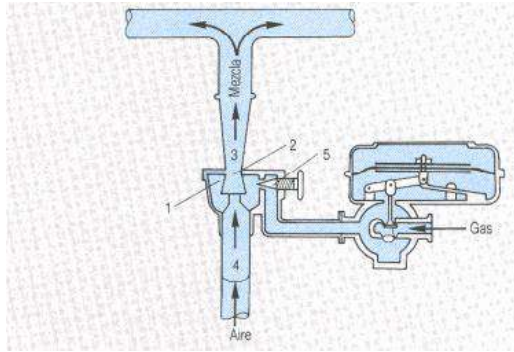


Figura 2.10. Mezclador con aire inductor a presión [3].

Comparación de ambos tipos de mezcladores

En la Tabla 2.4. se muestra una tabla comparativa respecto a ambos tipos de quemadores.

Tabla 2.4. Tabla comparativa entre mezclador de inducción atmosférica y mezclador de aire inductor y gas despresurizado [22]

Mezclador de inducción atmosférica	Mezclador de aire inductor y gas despresurizado
Geometría sencilla, fácil de manufacturar	Debido al regulador de gas, tiene una geometría más compleja
Funciona sólo con la presión del gas	Requiere un compresor de aire
Tiene un precio de compra bajo	Mayor precio debido al regulador de gas y el compresor
Baja presión de mezcla	Alta presión de mezcla
No requiere energía auxiliar	Requiere energía auxiliar
Sensible a las contrapresiones de la cámara de combustión	Insensible a las contrapresiones de la cámara de combustión

Regula el gas, pero no el aire	Regula flujo de gas y de aire
--------------------------------	-------------------------------

Quemador de premezcla por inducción atmosférica

Conocidos comúnmente como quemadores atmosféricos, ya que el aire entra debido a la presión atmosférica. Su principio de funcionamiento es el efecto Venturi, y cumple con las siguientes características [22]:

- No supera potencias de 290.75 kW (992,660 BTU/h)
- Es el quemador más sencillo y barato
- No puede trabajar con cámaras de combustión sobrepresionadas
- Tiene mucha sensibilidad al arrastre de aire con las variaciones de presión del recinto donde se sitúe el quemador.

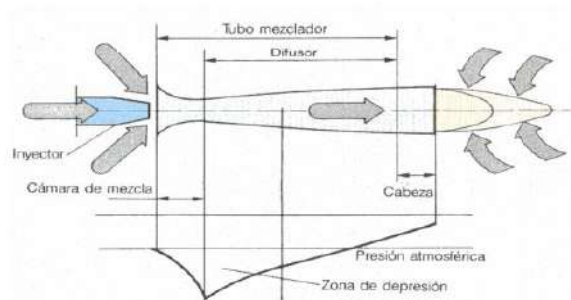


Figura 2.11. Componentes de un quemador de premezcla por inducción atmosférica [22]

El quemador de premezcla tiene 3 componentes principales:

1. Inyector: también conocido como esprea, este componente inyecta un flujo de combustible hacia el quemador.
2. Cámara de mezcla: aquí el aire y el combustible se mezclan, en esta zona existe un tubo Venturi, donde succiona el flujo y posteriormente se desarrolla la mezcla.
3. Cabeza del quemador: en esta zona sale la mezcla lista para ser encendida.

En la Figura 2.12. se muestra un diagrama de un quemador de premezcla por inducción atmosférica [22].

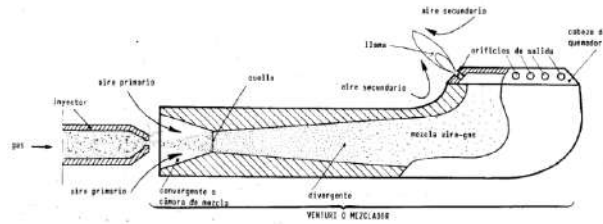


Figura 2.12. Variación de un quemador de premezcla por inducción atmosférica. [22]

Los quemadores a lo largo de los años han estado mejorando junto con las secadoras de ropa. Esto mediante pruebas experimentales y conocimiento empírico por parte de los ingenieros. Al ser un componente con alto riesgo de accidentes y manejo de temperaturas elevadas, debe funcionar acorde a una normatividad que asegure que cumpla con requerimientos de calidad, seguridad y eficiencia. Tanto nacionales como internacionales, las organizaciones encargadas de regular la calidad y seguridad de las secadoras de ropa son la Asociación Canadiense de Estándares (CSA), el Reporte para el consumidor de Estados Unidos, el departamento de energía de Estados Unidos (DOE) y UL, el cual certifica bajo la norma ANSI Z21.5.1 [3].

2.6. Emisiones en la combustión

La combustión completa con la menor penalización energética en forma de combustible sin quemar y sin hollín es lo que se busca en cualquier proceso de combustión. Medioambientalmente y por seguridad es prioridad minimizar las emisiones de óxidos de nitrógeno y hollín. Por ello, es necesario conocer en qué condiciones se forman, y así minimizar la presencia en la combustión [23].

2.6.1. Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno NO y NO₂, también conocidos como NO_x, son compuestos que se generan en combustiones a alta temperatura, reaccionando oxígeno con nitrógeno. Cuando se forman óxidos de nitrógeno, el monóxido de nitrógeno es más común que el dióxido de nitrógeno, este representando menos del 5% de los niveles de NO_x [23].

2.6.2. Hollín

El hollín es una sustancia sólida que se forma en las cámaras de combustión, en presencia de zonas ricas en combustible y a altas temperaturas, teniendo una combustión incompleta. Por ello, el hollín es sinónimo de mala combustión. La presencia del hollín es indeseable a nivel termodinámico, ambiental y de mantenimiento [23].

2.6.3. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es una sustancia incolora e inodora resultante de una combustión incompleta. Esta sustancia es un producto de combustión indeseable debido a su alta toxicidad para el ser humano, además del impacto energético negativo [24].

2.6.4. Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es una sustancia que representa una combustión completa. Ya que en la combustión el hidrocarburo al mezclarse con el oxígeno, se genera monóxido de carbono y agua. Posteriormente, el monóxido de carbono se mezcla con otra molécula de oxígeno, formando dióxido de carbono. También es una sustancia incolora e inodora. En efectos al ser humano, en altas concentraciones puede causar asfixia, sin embargo, no es tan dañino como el monóxido de carbono [24].

2.6.5. Efectos indeseables de los quemadores

Uno de los criterios para el diseño de quemadores de gas es evitar los efectos de separación, retroceso y puntas amarillas.

Separación de flama

También conocido como “lifting”, este fenómeno ocurre cuando la flama no está puesta a la salida de la porta, si no que la combustión existe a una distancia del quemador. Esto no es deseable por varias razones. Primero, existe el riesgo que se escape el combustible sin quemarse; segundo, la ignición es más complicada de lograr; y tercero, las flamas separadas suelen ser ruidosas. Este depende en la flama local y las

propiedades del flujo a la salida de la porta del quemador. Considerando una flama estable en un quemador, a bajas velocidades de flujo, la flama está pegada al quemador y se dice que está adjunto. Si se incrementa la velocidad de flujo de la mezcla, disminuye el ángulo del cono de la flama [24]. En la Figura 2.13., se muestra una flama con separación.



Figura 2.13. Separación de flama [25]

Retroceso de flama

También conocido como flashback, este fenómeno ocurre cuando la flama entra en el quemador y se propaga a través de la porta sin apagarse. Este fenómeno no solo es indeseable por cuestiones de desempeño, si no puede representar un peligro a la seguridad del usuario, ya que la flama puede retroceder a la fuente de combustible, causando una explosión. Este fenómeno suele ser transitorio y ocurre cuando el flujo de combustible disminuye o se cierra. Cuando la velocidad de reacción de la flama supera la velocidad del flujo, la flama se propaga aguas abajo a través de la porta que sea más larga que la distancia de enfriamiento [26].



Figura 2.14. Retroceso de flama [25]

Puntas amarillas

Las puntas amarillas es un fenómeno químico que ocurre en combustibles gaseosos. Esto indica una cantidad insuficiente de oxígeno. Físicamente es una flama con coloración amarilla/naranja. Este fenómeno muestra una reacción incompleta, generando monóxido de carbono y hollín, lo cual es indeseable por la toxicidad de dichas sustancias [26].



Figura 2.15. Puntas amarillas [27]

2.6.6. Estabilidad de la flama

El principio esencial para asegurarse una buena combustión en el régimen turbulento es que la velocidad de la flama local sea la misma que la velocidad media del flujo en la porta. Este principio se aplica para tanto flujo laminar como turbulento [24].

A continuación, en la Figura 2.16., se muestra un diagrama de estabilidad para una combustión de gas natural para un quemador de columna simple de diámetro de 2.7mm con espaciamiento de 6.35mm. el eje vertical representa el porcentaje de aire respecto al estequiométrico y el eje horizontal representa la cantidad de calor por unidad de área por unidad de tiempo de la porta.

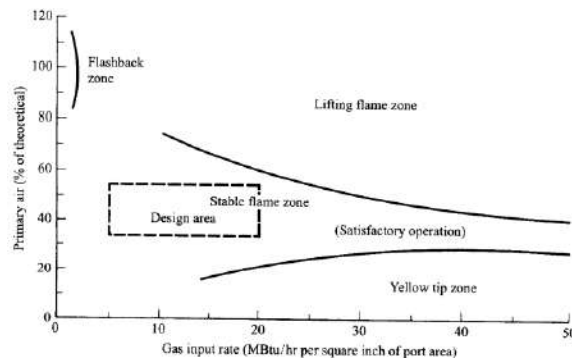


Figura 2.16. diagrama de estabilidad de flama [26]

El diagrama mencionado en la Figura 2.16. está realizada para un quemador en específico. Esta gráfica se realiza de manera experimental modificando la entrada de aire y de combustible y trazando en qué condiciones entra a algún modo de falla.

Turndown

El turndown es la relación entre la capacidad máxima y mínima del quemador. La capacidad máxima del quemador se limita por los efectos de separación de la flama (lifting), mientras que la capacidad mínima se limita por los fenómenos de retroceso (flashback) o por la capacidad de atomización del aire [28].

2.7. Ecuaciones de gobierno de flujo de fluidos

El flujo de fluidos se modela mediante ecuaciones diferenciales parciales, de los cuales son las siguientes ecuaciones [29]:

2.7.1. Modelos de turbulencia de dos ecuaciones

Este tipo de modelos de turbulencia son ampliamente utilizados debido a su buena precisión con relativamente bajo poder computacional requerido.

En los modelos de dos ecuaciones, la escala de velocidad de la turbulencia se calcula a partir de la energía cinética turbulenta, que se obtiene a partir de la solución de su ecuación de transporte. La escala de longitud turbulenta se estima a partir de dos propiedades del campo de turbulencia, normalmente la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación. La tasa de disipación de la energía cinética turbulenta se obtiene a partir de la solución de su ecuación de transporte [30].

Existen dos modelos de dos ecuaciones, el cual son los siguientes:

Modelo de turbulencia K- ω

Este modelo de turbulencia es utilizado debido a su buena precisión en partes cercanas a paredes en flujos de Reynolds bajos. Este modelo no involucra funciones de amortiguación no lineales que se utiliza en el modelo k- ϵ . Esto en estos casos le da una mayor precisión y robustez. El modelo k- ω supone que la turbulencia está

relacionada a la energía cinética de la turbulencia, y a su frecuencia. Su uso es ampliamente utilizado en aplicaciones en aerodinámica [30].

Modelo de turbulencia K-ε

El modelo de turbulencia k-epsilon consiste que en los modelos de turbulencia de dos ecuaciones se determina una longitud turbulenta y una escala de tiempo para solucionar dos ecuaciones de transporte separadas. Este modelo es ampliamente utilizado en ingeniería debido a su robustez, economía de poder computacional con una precisión aceptable para una amplia gama de flujos [31].

K se define como la energía cinética de turbulencia y representa la varianza de las fluctuaciones de velocidad. Tiene dimensiones de $L^2 t^{-2}$ (por ejemplo, m^2/s^2).

ε es la disipación de remolinos de turbulencia (la velocidad a la que se disipan las fluctuaciones de velocidad) y tiene dimensiones por unidad de tiempo $L^2 T^{-3}$ (por ejemplo, m^2/s^3) [30].

Las ecuaciones de gobierno mostradas a continuación (ecuaciones 2.12.-2.15.) se consideran para el modelo de turbulencia k-ε.

Considerando lo anterior, las ecuaciones de continuidad (2.12), momentum (2.13) y energía (2.14) son las siguientes [30]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j)}{\partial X_j} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i E) = \dot{\omega}_T + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{Q} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \sum_{k=1}^N h_{s,k} Y_k V_{k,i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} u_i) + \rho \sum_k Y_k f_k(u + V_k) \quad (2.14)$$

2.7.2. Ecuación de especies

El combustible, oxidante y los productos de un proceso de combustión son variables escalares y se consideran como fracciones de masa de un fluido multicomponente [32].

Cada fracción de masa se calcula a partir de una ecuación genérica de transporte por advección-difusión con términos fuente para tener en cuenta el consumo o la producción de especies [32].

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j Y_i)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\Gamma_{i,eff} \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + R_f \quad (2.15)$$

donde R_f es el término fuente que representa la generación o consumo de un reactivo o producto. El término fuente depende del modelo y de la reacción.

2.7.3. Modelos de combustión

Existen tres modelos de combustión utilizados en la dinámica de fluidos computacional: el cual son los siguientes:

Modelo de combustión de disipación de Eddy

Este tipo de modelos asume que la reacción es rápida en comparación a los procesos de transporte del fluido. La tasa de reacción es proporcional a un tiempo de mezclado definido por energía cinética (k) y su tasa de disipación (ϵ). Este modelo aplica únicamente para flujo turbulento [32].

Modelo de combustión de rapidez finita

Este modelo se utiliza para tasas de reacción química lentas, la tasa de reacción se utiliza directamente de la tasa de reacción química utilizando valores promedios de las fracciones de masa y temperaturas. Este valor medio se utiliza debido a que la reacción química lenta no responde a fluctuaciones relativamente rápido de turbulencia [32].

Modelo de combustión combinado

Se consideran ambos modelos en función del comportamiento de la tasa de reacción química en función de las iteraciones, el software de simulación selecciona el modelo de combustión más adecuado para el caso que se esté analizando.

2.8. Solución de ecuaciones de gobierno de flujo de fluidos

La resolución de las ecuaciones 2.12. - 2.15. no son posibles de solucionar por medios analíticos. Por ello, se optan por métodos numéricos aplicados al caso a estudiar. La forma aplicación de los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de gobierno de los fluidos se muestra a continuación:

2.8.1. Principio del CFD para solución de ecuaciones

La programación del CFD está estructurada con base a algoritmos numéricos para buscar solucionar las ecuaciones mencionadas anteriormente. Estos algoritmos dependen principalmente de métodos numéricos, de tal forma que, para predecir el comportamiento de un fluido en un volumen de control, dicho volumen debe discretizarse en una malla conformada por celdas de menor tamaño unidas por nodos.

La precisión de los resultados depende de la densidad de malla, una malla con un número mayor de celdas equivale a más precisión, pero con un mayor número de ecuaciones para resolver. Estas ecuaciones se resuelven mediante algún paquete comercial de CFD. Actualmente, los paquetes de CFD comerciales cuentan con algoritmos para optimizar la malla, ofreciendo datos con una precisión aceptable.

Mediante el software, se alimenta con información que se sabe del volumen de control a estudiar (flujos másicos, temperaturas, presión atmosférica, velocidades de entrada, etc.), para posteriormente solucionar las ecuaciones generadas en cada elemento de la malla mediante un proceso iterativo. Teniendo como referencia una variable general de flujo Φ , ya sea una un componente de velocidad o entalpía, en un volumen finito de control se puede expresar como un balance entre varios procesos que tienden a aumentar o disminuir su valor.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Tasa de cambio} \\ \text{de } \Phi \text{ en un volumen} \\ \text{de control con} \\ \text{respecto al tiempo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Tasa neta de cambio} \\ \text{de } \phi \text{ debido a la} \\ \text{convección en} \\ \text{un volumen de control} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Tasa neta de incremento} \\ \text{de } \Phi \text{ debido a la} \\ \text{difusión en un} \\ \text{volumen de control} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Tasa neta de} \\ \text{creación de } \Phi \text{ dentro} \\ \text{de un volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right] \quad (2.16)$$

Los algoritmos del CFD contienen técnicas de discretización adecuadas para el fenómeno clave de transporte: convección (flujo de fluidos), difusión (variaciones de la variable de punto a punto) y su tasa de cambio respecto al tiempo. El fenómeno que se busca estudiar suele ser complejo y no lineal, por lo que se resuelve mediante iteraciones. El algoritmo de solución depende del software, el cual cada vez se están optimizando para obtener mejores resultados. El caso particular de la presente tesis, en el capítulo III se muestra, en la etapa de desarrollo de medición, una metodología aplicada para desarrollar la simulación para solucionar el problema propuesto [33].

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DESARROLLO

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo mediante la metodología de diseño 6 sigma DMADOV. Esta metodología cuenta con seis etapas: Definición, Medición, Análisis, Diseño, Optimización y Validación. En la

Figura 3.1., se muestra un diagrama detallando las actividades en cada fase de desarrollo:

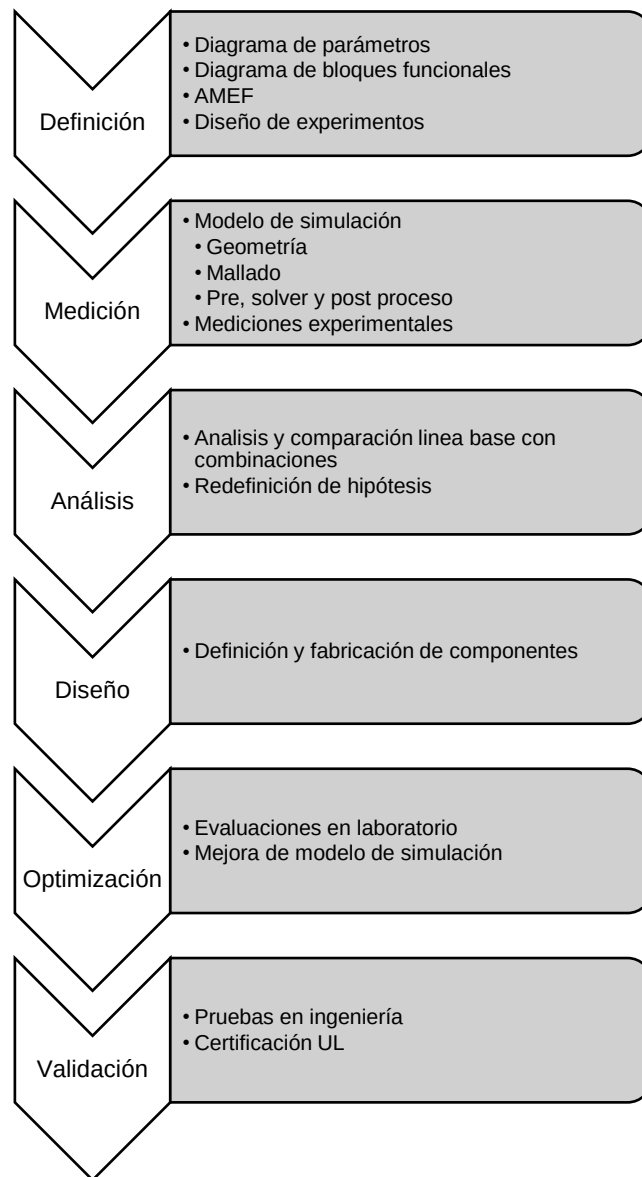


Figura 3.1. Metodología de desarrollo.

3.1. Definición

En esta fase se identifica el nuevo producto, servicio o proceso a diseñar o rediseñar. Aquí se elabora el marco del proyecto, asignación de actividades, definición de metas y variables internas y externas del cliente [34]. Aquí se definen herramientas de análisis como el diagrama de parámetros, diagrama de bloques funcionales y el análisis de modo y efecto de falla (AMEF), el cual se muestran a continuación. En esta etapa se realizó un estudio enfocado en el desarrollo del diseño de experimentos. A continuación, se muestran cada una de las herramientas mencionadas anteriormente:

3.1.1. Diagrama de parámetros

El diagrama de parámetros tiene como finalidad relacionar variables de entrada y salida de un sistema, estas tienen forma de variables medibles (temperatura, flujo másico, velocidad, fracción de masa, etc.). Al relacionar una entrada con una respuesta, influyen otros parámetros, como lo son de control, que representa qué variables, como por ejemplo geométricas, se pueden dominar; y las de ruido, que son fenómenos físicos que no se pueden controlar. El diagrama de parámetros mostrado en la Figura 3.2., muestra el proceso de combustión de la secadora de ropa.

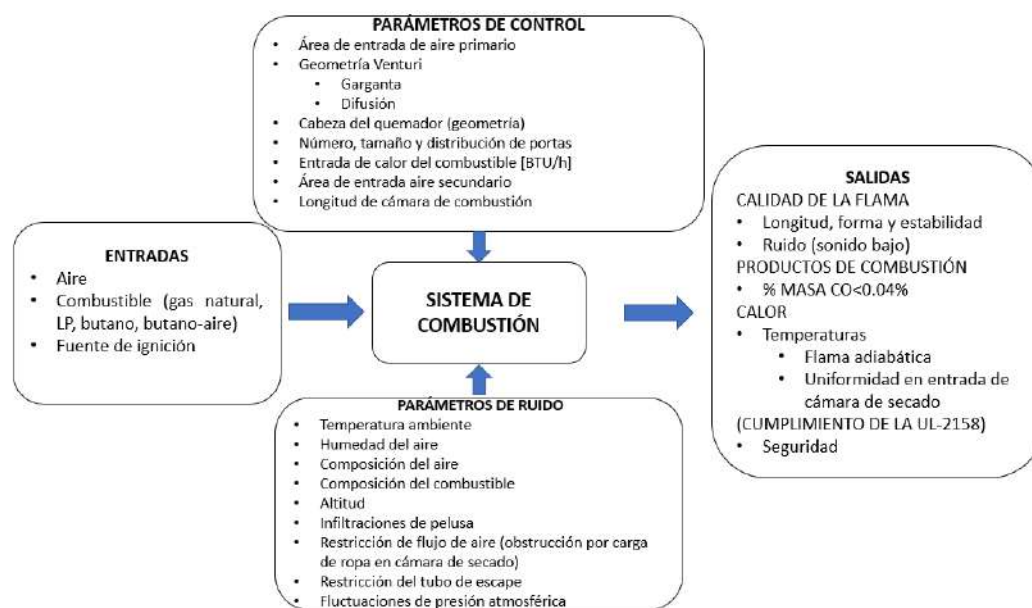


Figura 3.2. Diagrama de parámetros del sistema de combustión.

Como se muestra en la Figura 3.2., en el quemador entra lo siguiente: aire y combustible a una razón de flujo específico, el flujo de combustible es expresado en forma de capacidad calorífica. del quemador sale una flama con una longitud, forma y estabilidad determinada, además de los productos de combustión y una cantidad de calor. Este proceso puede ser controlado mediante la geometría del quemador y el resto del sistema de combustión; y alterado por condiciones externas (ambientales), como la fluctuación de la presión atmosférica a lo largo del día, la cual no se puede controlar.

3.1.2. Diagrama de bloques funcionales

El diagrama de bloques funcionales tiene la finalidad de mostrar la interacción entre los componentes en un ensamble y su forma de sujeción. Además, es útil para identificar los componentes que serán afectados en cuanto a rediseño (ver Figura 3.3.). El diagrama de bloques funcionales permite identificar las funciones de los componentes y da pie a identificar los modos potenciales de falla:

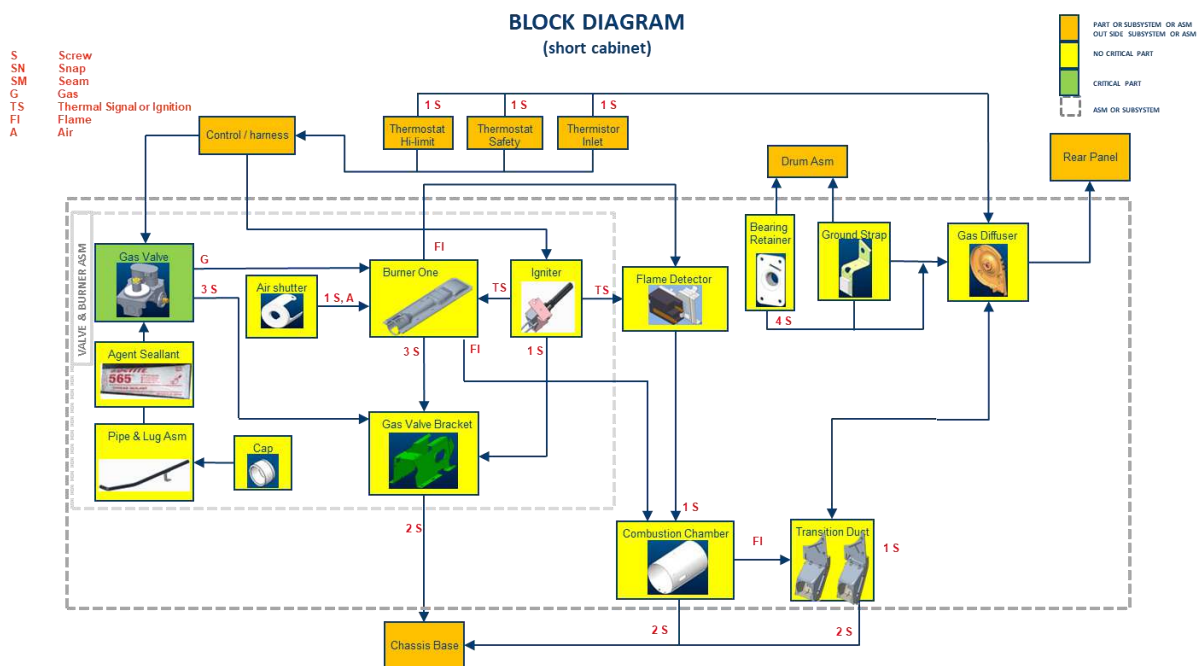


Figura 3.3. Diagrama de bloques funcionales del sistema de combustión de la secadora de ropa

3.1.3.AMEF

El análisis de modo y efecto de falla es una herramienta que muestra todos los posibles casos en los que puede fallar el sistema o cada componente, su posible causa, nivel de severidad, posibles soluciones, modos para controlar el fallo, etc. A continuación, en la Figura 3.4. se muestran las funciones y modos de falla más comunes, considerando únicamente el quemador, cámara de combustión y ducto de transición:

Quemador	<u>FUNCIONES</u> • Mezclar el aire primario con gas • Acelerar la mezcla aire combustible • Direccionamiento de flama	<u>MODOS DE FALLA</u> • Retroceso • Separación • Mala combustión • Desalineamiento respecto a la cámara de combustión • No ignición
Cámara de combustión	<u>FUNCIONES</u> • Proveer un volumen para que la combustión se lleve a cabo • Aislamiento de la flama • Proveer aire secundario • Proveer posición y soporte al detector de flama • Conducir los gases de combustión al ducto de transición.	<u>MODOS DE FALLA</u> • Mala combustión • Fuga de calor y de flama. • Separación de flama. • Puntas amarillas. • Flamas largas. • No se active el detector de flama. • Presencia de hollín
Ducto de transición	<u>FUNCIONES</u> • Conducir el aire al difusor de gas • Aislamiento de gases de combustión calientes • Provee una entrada de aire secundario a la flama	<u>MODOS DE FALLA</u> • Pérdidas de calor • Pérdidas de flama • No proveer aire secundario correcto • Ruido • Esquinas filosas • Interferencia entre componentes (cámara de secado)

Figura 3.4. Modos de funciones y fallas.

El AMEF define el funcionamiento correcto de un componente y cómo podría fallar. Este documento califica el potencial modo de falla con tres rubros que se escalan del 1 al 10:

Severidad: Es la magnitud de consecuencias en el cliente en caso de que el modo de falla ocurra. El valor de 1 equivale a que el cliente no se percate del modo de falla, y

el valor del 10 significa que pone en peligro al cliente, siendo una falla indetectable para el sistema de seguridad. Este número no se puede recalificar en el futuro.

Probabilidad de falla durante la vida del equipo: esta escala define qué tan probable es que el modo de falla ocurre. El valor de 1 significa que la tasa de fallas es menor a 1 entre 1,500,000. Mientras que el valor de 10 ocurre más del 50% de las veces.

Probabilidad de detección por diseño de control: esta escala define qué tan probable se detecte antes de llegar al siguiente cliente. El valor de 1 significa que es seguro que la falla potencial se va a encontrar y prevenir antes de llegar al siguiente cliente; y 10 equivale a que hay una certeza que no se va a detectar.

Estos tres rubros se multiplican para calcular un valor conocido como NPR (Número Prioritario de Riesgo). El NPR ayuda a cuantificar el nivel de impacto de un modo de falla, y así saber a qué modos de falla se les debe priorizar para minimizar. Esto incluye desde cambios de diseño, mejoras en forma de detección o pruebas de laboratorio. Su finalidad es aplicar el cambio y minimizar o eliminar estos modos de falla. En el anexo B se muestra un fragmento del AMEF de la secadora de ropa.

Las herramientas mostradas anteriormente se utilizan como información previa al diseño de experimentos, esto para entender todas las implicaciones de seguridad, desempeño y confiabilidad del producto y tomar las decisiones más acertadas para el negocio y las necesidades del cliente.

3.1.4. Diseño de experimentos

Los diseños de experimentos son utilizados comúnmente para validación de hipótesis donde se involucren varias variables en varios niveles. Ya sea cambio de materiales, geometrías, condiciones de operación de un proceso, flujos másicos, etc. Muchas de estas pruebas suelen realizarse por medio de pruebas de laboratorio, relacionando una entrada con una salida y buscar una mejora o resultado deseado [35]. En este caso, el DOE se realizó de manera numérica mediante el software de simulación ANSYS R12 para determinar qué combinaciones presentan un incremento de

temperatura a la entrada de la cámara de secado, con la finalidad de minimizar el consumo de combustible.

Se realizó un diseño de experimentos de 3^3 de manera numérica utilizando el software ANSYS CFX con las siguientes variables de entrada: tres modelos de quemadores, tres modelos de cámara de combustión y tres modelos de ductos de transición, el cual se muestran en la siguiente sección:

Variables de entrada

Quemadores

A continuación, se muestran tres propuestas de quemador:

El primer quemador, el cual es de producción actual, consta de un ensamble de 4 componentes, mostrados Figura 3.5: el reductor Venturi (1), que disminuye el diámetro de la garganta del Venturi, evitando recirculamientos en la zona de difusión; el obturador de aire (2), que regula la entrada de aire pudiendo cambiar de posición para que el quemador funcione con otros combustibles (LP, butano y butano-aire); el quemador (3), el cual se ensambla por medio de dos caras; y el reductor de porta (4), que ajusta el área de porta incrementar la velocidad de la mezcla en la garganta del quemador, aumentando el arrastre de aire dentro del quemador. Para el diseño de experimentos, no se consideran los elementos 1, 2 y 4.



Figura 3.5. Quemador línea base con sus componentes adicionales

El segundo quemador es conocido como el quemador unificado, el cual es una mejora del quemador actual. Este quemador cuenta con el reductor Venturi, reductor de porta y otras mejoras integradas en su diseño, buscando disminuir el número de piezas y

ensambles en la línea de producción. En la Figura 3.6 se muestra una comparación entre los quemadores actual y unificado.

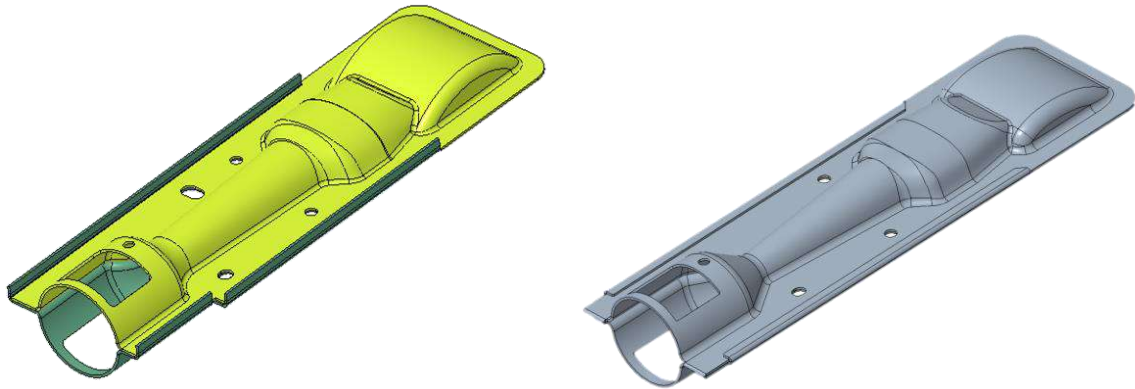


Figura 3.6. Quemador actual (izquierda) y unificado (derecha)

En la Figura 3.7., se muestra una comparativa entre ambos quemadores, el quemador actual (izquierda) muestra un cambio de sección curvo en la garganta; mientras que en el unificado muestra un cambio de sección recto, además de mostrarse más cerrado.

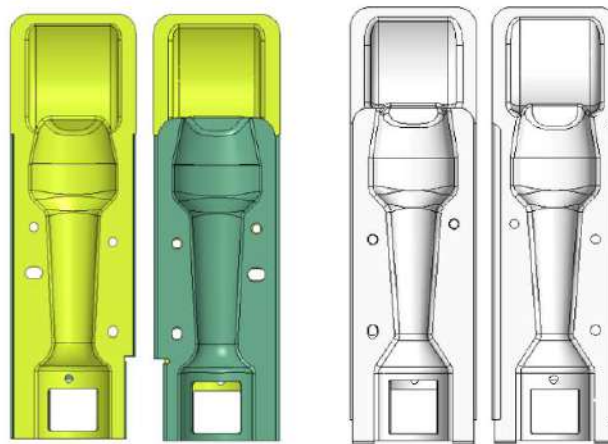


Figura 3.7. comparación quemador actual y unificado

El tercer quemador para fines del experimento se conocerá como QMP. Este quemador se presentó como propuesta en el trabajo presentado por Urbiola et al “diseño de un quemador de gas para mejora del desempeño energético de una secadora de ropa”. Este quemador opera bajo el mismo principio que los dos

anteriores. Sin embargo, cuenta con una geometría disruptiva. Este quemador funciona bajo el mismo efecto Venturi que los quemadores anteriores, por temas de protección legal no se muestra información respecto al tercer quemador. La imagen mostrada en el resumen de las variables de entrada del diseño de experimentos (Figura 3.13.), muestra una imagen meramente representativa de un quemador.

Cámaras de combustión

Las tres propuestas de cámara de combustión son las siguientes: la cámara de combustión actual, el cual consiste en una lámina doblada en forma de cilindro; la cámara cónica, una cámara en forma de cono truncado con comportamiento divergente; y la cámara cónica con arremolinador, el cual cuenta con una serie de aspas a la entrada de la cámara de combustión con la finalidad de redireccionar el aire, incrementando su tiempo de residencia. En Figura 3.8. se muestran las tres cámaras de combustión



Figura 3.8. Cámaras de combustión línea base, cónica y cónica con arremolinador

Ductos de transición

Se tienen tres propuestas de ducto de transición, el cual se explican a continuación:

El primero es el ducto de transición de la producción actual, consiste en un cuerpo de forma similar a una caja en la que cuenta con dos orificios: uno para conectar con la cámara de combustión y otro para dirigir los gases calientes a la cámara de secado. El ducto de transición de producción actual se muestra en la Figura 3.9.

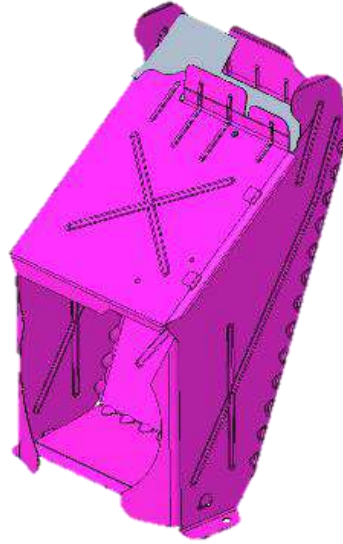


Figura 3.9. Ducto de transición de producción actual

Este ducto de transición cuenta con dos componentes añadidos: un deflector de flama y una lámina de difusión. La lámina de difusión consiste en una lámina triangular que evita infiltraciones de aire y escapes de calor a la salida del ducto de transición. Esta lámina se ensambla en la parte superior del ducto de transición la lámina. El deflector de flama es una lámina cuya funcionalidad es redireccionar el flujo de aire caliente a los termostatos ubicados en la parte superior derecha del difusor de gas (ver Figura 3.35.) estos controlan la válvula. Ambos componentes se muestran en la Figura 3.10.

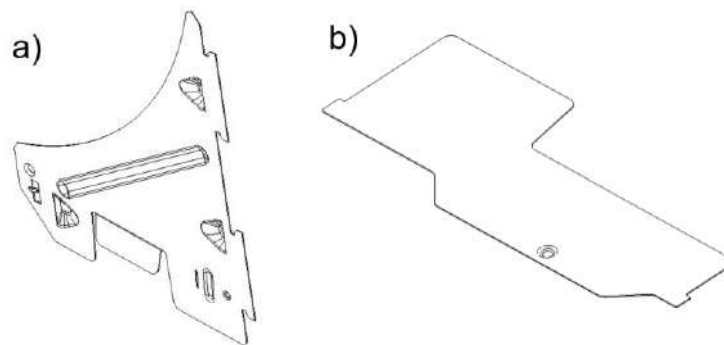


Figura 3.10. Elementos añadidos al ducto de transición: a) Lámina de difusión, b) deflector de flama

En el ensamble, la lámina de difusión y el deflector de flama se muestran en la siguiente figura (ver Figura 3.11):

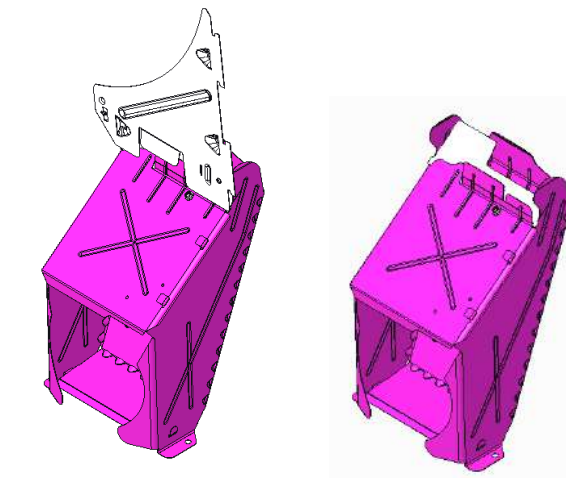


Figura 3.11. Ubicación de ensamble de lámina difusora (izquierda) y deflector de flama (derecho)

El segundo ducto de transición es un ensamble de dos componentes similar al anterior, cuenta con un deflector de flama y una lámina difusora integrada, por lo que son menos operaciones de ensamble. Este ducto de transición cuenta con la conexión de la cámara de combustión más cerrada, por lo que aporta menor aire secundario a la entrada. A la salida el deflector de flama al estar fabricado desde la misma lámina difusora integrada cuenta como una entrada de aire adicional. Es el modelo con menor entrada de aire de los tres.

El tercer ducto de transición es idéntico al segundo, con la única diferencia es que contiene un deflector de flama, cuya función es similar al deflector añadido en el concepto actual de ducto de transición.

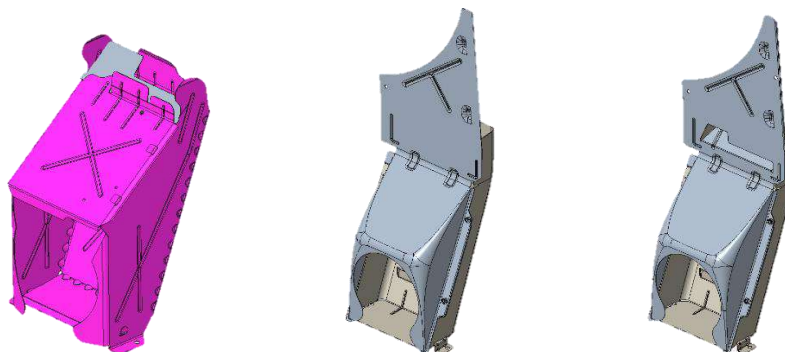


Figura 3.12. Ductos de transición línea base, modificado sin deflector y modificado con deflector

A continuación, se muestra un diagrama de todas las combinaciones.

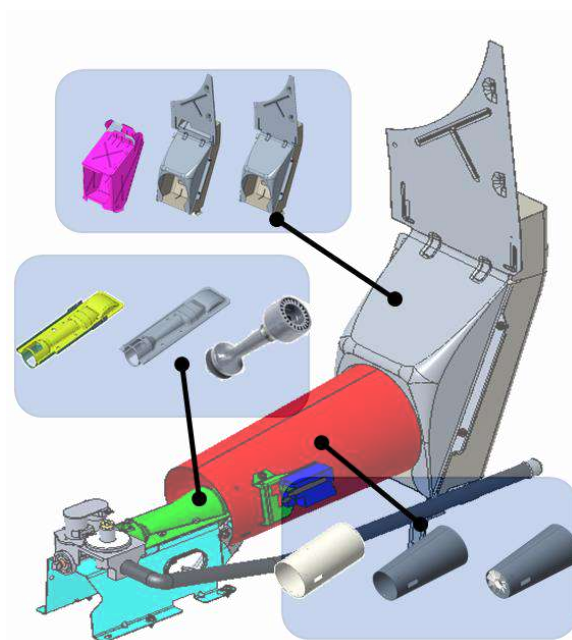


Figura 3.13. Componentes del diseño de experimentos.

Set-up del diseño de experimentos

A continuación, en la Tabla 3.1. se muestra el set-up de corridas del diseño de experimentos.

Tabla 3.1. Set-up de corridas de diseño de experimentos

#	QUEMADOR	CAMARA	TD
1	LINEA BASE	CILINDRICA	LINEA BASE
2	LINEA BASE	CILINDRICA	TD SIN DEFLECTOR
3	LINEA BASE	CILINDRICA	TD CON DEFLECTOR
4	LINEA BASE	CONICA	LINEA BASE
5	LINEA BASE	CONICA	TD SIN DEFLECTOR
6	LINEA BASE	CONICA	TD CON DEFLECTOR
7	LINEA BASE	CONICA CON ARREM.	LINEA BASE
8	LINEA BASE	CONICA CON ARREM.	TD SIN DEFLECTOR
9	LINEA BASE	CONICA CON ARREM.	TD CON DEFLECTOR
10	UNIFICADO	CILINDRICA	LINEA BASE
11	UNIFICADO	CILINDRICA	TD SIN DEFLECTOR
12	UNIFICADO	CILINDRICA	TD CON DEFLECTOR
13	UNIFICADO	CONICA	LINEA BASE
14	UNIFICADO	CONICA	TD SIN DEFLECTOR

15	UNIFICADO	CONICA	TD CON DEFLECTOR
16	UNIFICADO	CONICA CON ARREM.	LINEA BASE
17	UNIFICADO	CONICA CON ARREM.	TD SIN DEFLECTOR
18	UNIFICADO	CONICA CON ARREM.	TD CON DEFLECTOR
19	QMP	CILINDRICA	LINEA BASE
20	QMP	CILINDRICA	TD SIN DEFLECTOR
21	QMP	CILINDRICA	TD CON DEFLECTOR
22	QMP	CONICA	LINEA BASE
23	QMP	CONICA	TD SIN DEFLECTOR
24	QMP	CONICA	TD CON DEFLECTOR
25	QMP	CONICA CON ARREM.	LINEA BASE
26	QMP	CONICA CON ARREM.	TD SIN DEFLECTOR
27	QMP	CONICA CON ARREM.	TD CON DEFLECTOR

El set-up de corridas del diseño de experimentos se realizó de forma no aleatoria. Esto debido a que, al ser un experimento numérico, no existen factores humanos que influyan en la ejecución del experimento.

3.2. Medición

Para la etapa de medición se consideraron dos tipos: las mediciones numéricas y las mediciones experimentales. Para las mediciones numéricas se definieron las siguientes variables: temperatura de flama, longitud de flama, temperatura a la entrada de la cámara de secado y distribución. Las mediciones numéricas cuentan con la facilidad de monitorear propiedades físicas, químicas y termodinámicas en una coordenada en específico, y monitorear dichas propiedades en función del avance de las iteraciones. Para las mediciones experimentales se evaluó la de temperatura a la entrada de la cámara de secado y su distribución, además de emisiones en el ducto de transición. La temperatura de flama no se midió experimentalmente debido a las limitaciones del equipo de mediciones del laboratorio, al requerir registrar temperaturas fuera del rango de medición especificado. A continuación, se muestra el proceso de las mediciones numéricas:

3.2.1. Modelación numérica de línea base y diseño de experimentos

Existe una metodología establecida para hacer una simulación CFD por medio del paquete de ANSYS, CFX. Esta metodología cuenta con 5 fases: preparación de geometría, mallado, pre-proceso, solución y post procesamiento. En la Figura 3.14. se presenta un diagrama general donde se muestran las fases.

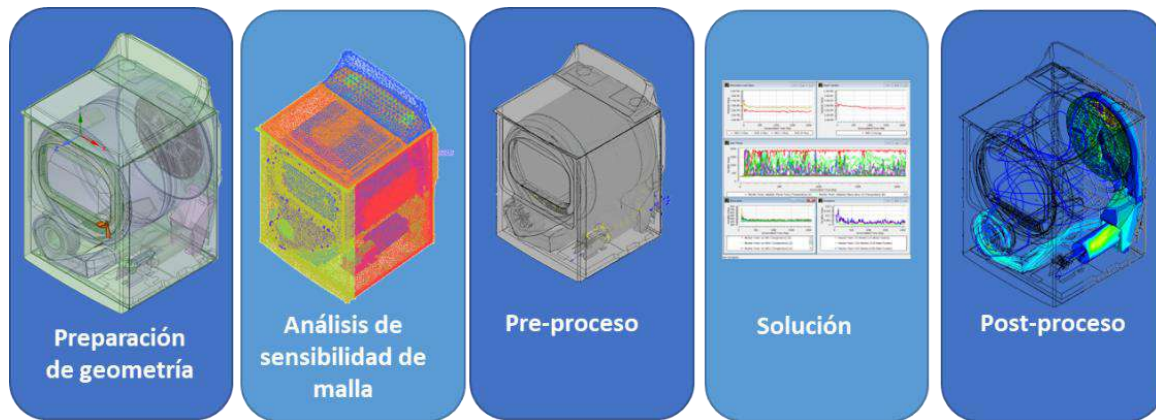


Figura 3.14. Proceso de simulación CFD

Preparación de geometría

En esta fase se adecúa la geometría para la simulación. Se utiliza información del elemento de una base de datos y se hacen simplificaciones. Esta fase idealiza el proceso, sin embargo, el porcentaje de error que generan estos cambios son bajos en comparación al poder computacional que se suele ahorrar. Las adecuaciones realizadas en esta etapa son las siguientes:

Depuración de componentes

Se eliminan o simplifican componentes que, al realizarse el cambio, no generan un impacto significativo en el comportamiento del fenómeno que se busca estudiar. Se suelen descartar barrenos, tornillería, radios pequeños y otros elementos innecesarios.

Extracción de superficie

Esta fase consiste en convertir en simplificar la geometría del cuerpo a analizar a superficies con un espesor cero. Esta operación se aplica a los elementos hechos con pared delgada. Es decir, todo lo que esté hecho a partir de lámina. Tomando en cuenta

la secadora de ropa, todo elemento, a excepción de la válvula de gas y la esprea, se puede aproximar a superficies. La extracción de superficies se realiza en el programa SPACECLAIM de ANSYS.

Afinado de geometrías

El afinado de geometrías es una inspección que se realiza a las superficies resultantes. Esta fase existe a causa de las imperfecciones del proceso de extracción, ya que pueden generarse geometrías complejas, brechas indeseables, etc. Esta fase evita problemas de divergencia asociados a geometrías.

En esta fase, la geometría de la secadora se importó en ANSYS SPACECLAIM desde el software CAD 3D CREO PARAMETRIC con la transformación de piezas solidas a superficies. En la Figura 3.15., se muestra la simplificación del Modelo CAD de la secadora a superficies.

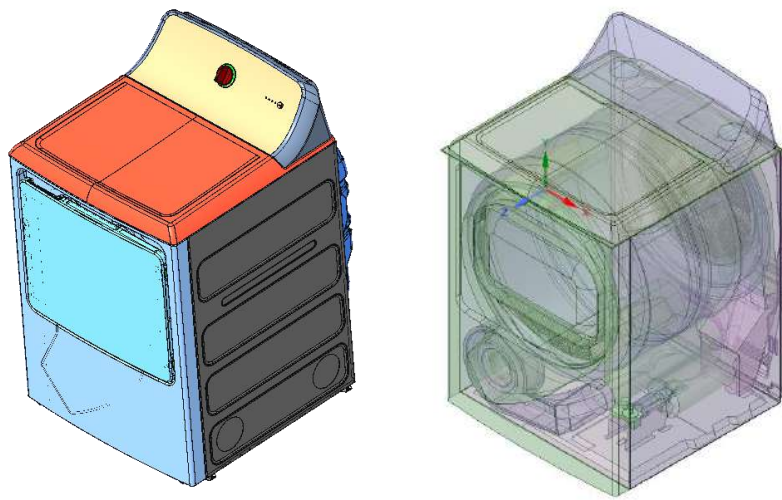


Figura 3.15. Simplificación de datos de sólidos a superficies para optimización de poder computacional

Mallado

Tras el creciente desarrollo tecnológico, los algoritmos de mallado han mejorado, lo que, como resultado, los paquetes comerciales cuentan con herramientas que ayudan a optimizar la malla. Uno de los resultados directos de este desarrollo ha sido la expansión de los elementos de malla disponibles y la conectividad de malla (cómo se

conectan las celdas entre sí). Dependiendo del caso que se esté estudiando, se utiliza un tipo determinado de malla. Los tipos de malla se explican a continuación:

Tipos de mallado

Las clasificaciones más sencillas de mallas se basan en la conectividad de una malla o en el tipo de elementos presentes. Actualmente, existen dos clasificaciones de malla: la clasificación basada en conectividad y la clasificación basada en elementos [36].

Clasificación basada en conectividad

Esta es la forma de clasificación de mallado más simple, y existe por mallado estructurado y mallado no estructurado. El mallado estructurado consiste en una malla caracterizada por una conectividad regular que se puede expresar como una matriz de dos o tres dimensiones, restringiendo las opciones de elementos a cuadriláteros en 2D o hexaedros en 3D. Un mallado no estructurado está caracterizado por una conectividad irregular, el cual no puede expresarse fácilmente como una matriz de dos o tres dimensiones en la memoria de la computadora. Esto permite cualquier elemento posible que un solucionador pueda usar. En comparación con las mallas estructuradas, los requisitos de almacenamiento para una malla no estructurada pueden ser sustancialmente mayores, ya que la conectividad entre celdas debe almacenarse explícitamente. [36]

Clasificación basada en elementos

Las mallas también se pueden clasificar según la dimensión y el tipo de elementos presentes. Esto según al tipo de análisis y los requisitos del solucionador. Estas pueden ser bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D). Los elementos comunes en 2D son triángulos o rectángulos, y los elementos comunes en 3D son tetraedros o ladrillos [36].

Proceso de mallado

La malla se realizó en el software de ANSYS, ICEM. Donde también se añadió un volumen de control en la base y el respaldo para simular el ambiente (Figura 3.16.).

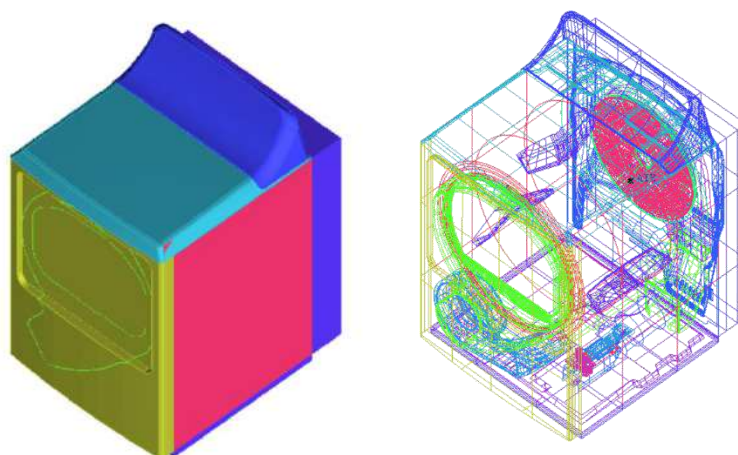


Figura 3.16. Modelo línea base en software ICEM

El diseño de experimentos fue realizado por el equipo de simulación, el tamaño máximo particular de cada componente se manejó en el rango de 0.025 a 0.5 pulgadas, dependiendo del tamaño del elemento y su importancia en el comportamiento de flujo de la secadora. Para un panorama general de mallado, se realizó con las siguientes condiciones:

Tabla 3.2. Parámetros de malla

Factor de escala	1.1
Número de elementos	14.85 millones
Tipo de mallado	Tetraédrico no estructurado

El criterio de aceptación de la malla fue por medio de la inspección de calidad. La calidad de malla representa, mediante una escala del cero al uno, qué tan cercano a la ortogonalidad se encuentra cada elemento. Idealmente se busca que la calidad tienda a uno. Se recomienda que la calidad de los elementos de la malla sea mayor a 0.2. En la Figura 3.17. se muestra un histograma de la calidad de la malla:

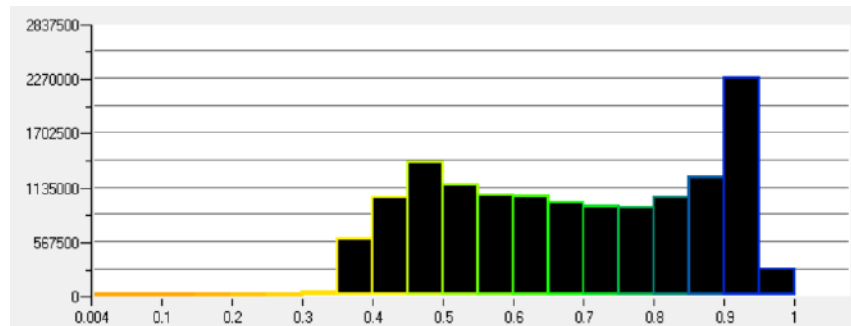


Figura 3.17. histograma de calidad de malla

Como se muestra en la Figura 3.17, la calidad de los elementos empieza a partir de 0.35, por lo que se considera aceptable la malla.

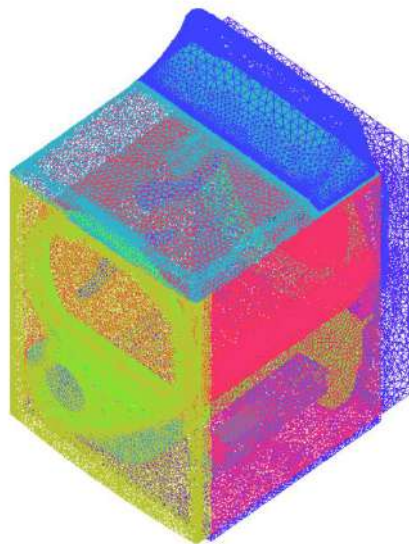


Figura 3.18. Mallado línea base.

Pre-proceso

En la fase de pre-proceso se carga la malla en el programa ANSYS CFX-PRE. En esta sección se declaran todos los fenómenos físicos, químicos y termodinámicos que gobiernan el comportamiento de la secadora. Además de cargar la malla generada de la geometría que se busca simular. Al cargar la malla se definen las ecuaciones de gobierno, que describen matemáticamente el comportamiento de los fluidos; los dominios, que son regiones en el espacio donde se definen y resuelven las ecuaciones de gobierno; y las condiciones de frontera, que son regiones bidimensionales que

representan delimitaciones dentro del dominio (entradas, salidas y paredes). También se añaden puntos de monitoreo, cuyo propósito es visualizar el comportamiento de las variables de interés (temperaturas, velocidades, fracciones de masa, etc.). En esta sección se decide el nivel de complejidad que se requiere en el modelo y el tipo de simulación (estado estable o estado transitorio), en este caso de estudio se considera estado estable. Se puede definir propiedades del cuerpo como espesor, material o en dado caso que sea adiabático; además de las condiciones atmosféricas como presión y temperatura ambiente [37].

Dominios

Se consideró un solo dominio de aire para la secadora. El dominio se definió como una mezcla reactante, con una morfología de fluido continuo, con flujo no boyante, en estado estacionario a una temperatura de 20°C y una presión de 0.81 atm, equivalente a la presión atmosférica en Querétaro (ver Figura 3.19).

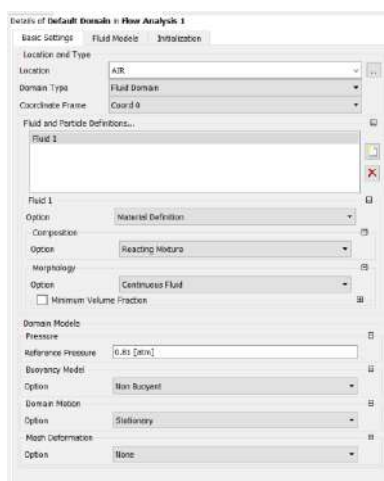


Figura 3.19. Dominio de simulación línea base

Modelos utilizados

La descripción de los modelos se muestra en el capítulo II. El modelo de turbulencia se realizó el modelo k-epsilon; y el de combustión se utilizó el modelo de tasa química finita y disipación de Eddy. Ambos modelos se detallan en la sección 2.7. En la Figura 3.20 se muestra una captura del set-up de la simulación. La exploración del modelo de radiación se explorará en trabajos futuros.

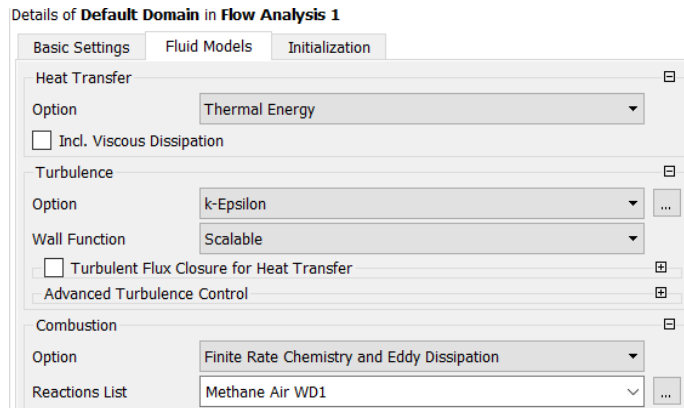


Figura 3.20. Set-up de dominio de flujo de aire

Creación de la mezcla

La simplificación de la combustión será en dos ecuaciones estequiométricas:

La primera ecuación representa la mezcla entre metano y oxígeno para generar agua y monóxido de carbono; la segunda ecuación representa la mezcla de oxígeno con monóxido de carbono para generar dióxido de carbono. Ambas ecuaciones se muestran en las ecuaciones 2.1. y 2.2. respectivamente.

Para la reacción química de metano oxígeno se añadieron los siguientes parámetros (ver Tabla 3.3):

Tabla 3.3. Parámetros de reacción metano oxígeno

Factor pre-exponencial	$3.1623 * 10^8 [m^{4.5} s^{-1} K^{-0.831} mol^{-1.5}]$
------------------------	--

Exponente de temperatura	0.8308
--------------------------	--------

Energía de activación	$99809 [J mol^{-1}]$
-----------------------	----------------------

Para la reacción química monóxido de carbono/oxígeno sus parámetros son los siguientes:

Para la tasa de reacción hacia delante de un modelo de Arrhenius (ver Tabla 3.4):

Tabla 3.4. Parámetros de reacción hacia adelante CO/O₂

Factor pre-exponencial **4.2094**[$\text{mol}^{-0.5} \text{s}^{-1} \text{m}^{1.5} \text{K}^{-0.1251}$]

Exponente de temperatura	0.1251
--------------------------	--------

Energía de activación 30.9486e3 [J mol^{-1}]

Para la tasa de reacción hacia atrás de un modelo de Arrhenius (Tabla 3.5):

Tabla 3.5. Parámetros de reacción hacia atrás CO/O₂

Factor pre-exponencial **1.4286e9** [$\text{s}^{-1} \text{K}^{-0.285}$]

Exponente de temperatura	0.1251
--------------------------	--------

Energía de activación 30.9486e3 [J mol^{-1}]

Condiciones de frontera

Salida de gas

Para el dominio de entrada de gas se utilizó una pared ubicada en la salida de la esprea. Mediciones experimentales determinaron que el flujo másico de gas es de 0.00012 kg/s de gas metano a temperatura ambiente (ver Figura 3.21.).

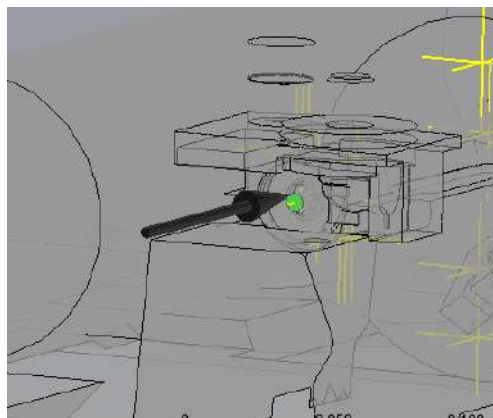


Figura 3.21. entrada de gas al sistema

Paredes

Todas las paredes se consideraron como paredes lisas, adiabáticas y sin deslizamiento. El dominio de paredes se muestra en la Figura 3.22.

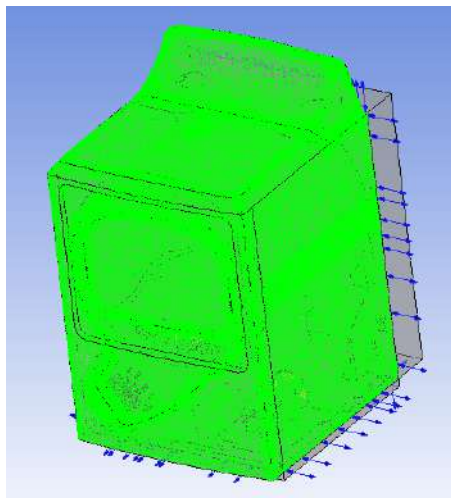


Figura 3.22. Paredes de la secadora

Aperturas

Existen aperturas que no se sabe si entra o sale la mezcla de gases. La mayoría de las aperturas se encuentran en el respaldo de la secadora, estas aperturas se conocen como louvers. Además de las aperturas en el respaldo, existe una pequeña apertura en la base del chasis de la secadora. Para ello, se añadió un volumen de aire para designarlo como una apertura. (ver Figura 3.23)

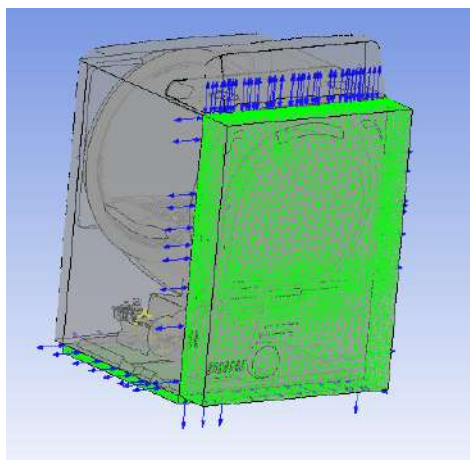


Figura 3.23. Apertura

Sistema de evacuación de gases húmedos

El sistema de evacuación de aire húmedo es el encargado de generar una corriente de flujo de gases desde el quemador hasta la cámara de secado. Los gases con la humedad extraída a los textiles en la cámara de secado son succionados por un ventilador y expulsados al ambiente. El proceso para la simulación del sistema de evacuación de gases húmedos se explica a continuación:

Volumen de control del ventilador

Los gases húmedos son succionados de la cámara de secado y expulsado al ambiente mediante un ventilador, por lo que su volumen de control se muestra en la Figura 3.24:

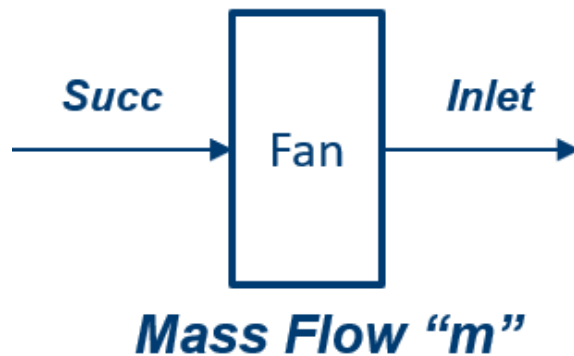


Figura 3.24. volumen de control del ventilador

Para propósitos de la simulación, el flujo másico de entrada se denominó como “Succ” y el flujo de descarga se denominó como “Inlet”.

Simplificación de ventilador

Simular el ventilador como un componente rotativo complicaría el modelo de simulación. Por ello, el ventilador se simplificó de una serie de aspas a un anillo segmentado en dos áreas diferentes: un área de succión (Succ), y un área de descarga (Inlet). En la Figura 3.25. se muestra la simplificación del ventilador de la secadora.

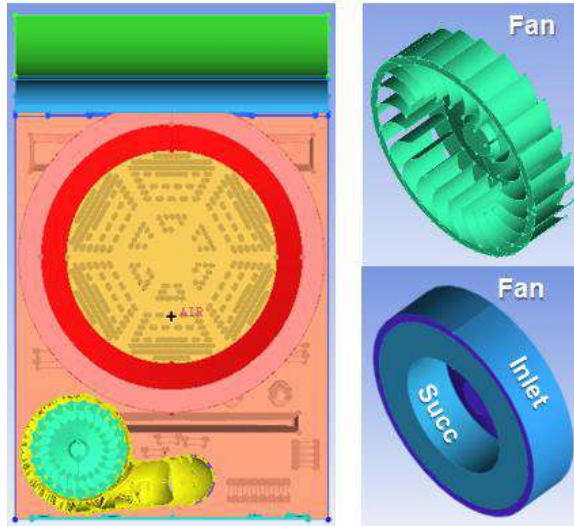


Figura 3.25. simplificación de extracción de aire de ventilador.

Ángulo de acción del ventilador

En la condición de frontera de descarga se debe definir un ángulo de salida de flujo que iguale el comportamiento del ventilador. En trabajos anteriores se concluyó que el ángulo de acción del ventilador es de 42° a una distancia de 101.6mm (4in) del centro del ventilador (ver Figura 3.26.).

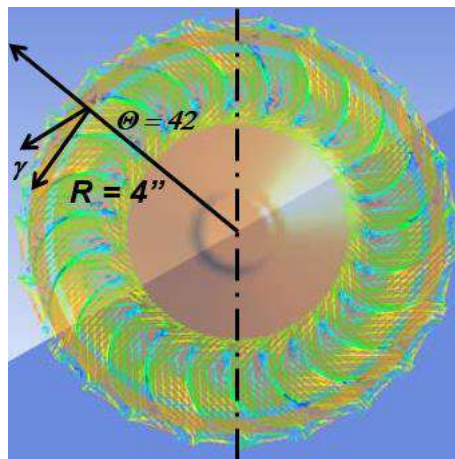


Figura 3.26. ángulo de acción de los álabes.

Curva del ventilador

Para alimentar el modelo de simulación, en trabajos anteriores se caracterizó el ventilador, encontrando una curva que relaciona la presión de succión necesaria para

evacuar un flujo volumétrico determinado. La curva del ventilador de la secadora de ropa se trazó midiendo el flujo volumétrico con presiones de succión desde 0 a 1 pulgadas columna de agua, con saltos de 0.1 inH₂O. por medio de una regresión polinomial, se obtuvo un polinomio de tercer orden que representa de manera acertada el comportamiento del ventilador. A continuación, en la Figura 3.27., se muestra la curva del ventilador obtenida.

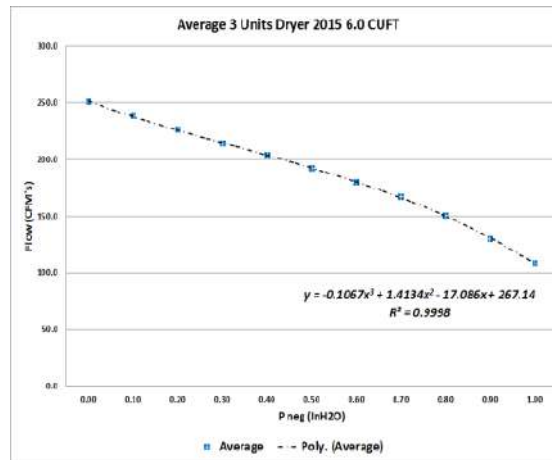


Figura 3.27. relación experimental flujo volumétrico/presión de succión

La ecuación expresada, adaptada en términos de flujo másico y presión de succión es la siguiente:

$$\dot{m} = 0.000472 * (-0.1067 * DP^3 + 1.4134 * DP^2 - 17.086 * DP + 267.14) * \rho_{descarga}$$

Donde:

- $\dot{m}$ es el flujo másico (kg/s)
- DP es la caída de presión (Pa)
- $\rho_{descarga}$ es la densidad promedio de descarga (kg/m³)

El valor 0.000472 es un factor de conversión para convertir pulgadas de columna de agua a pascales.

Alimentando el modelo de simulación, las condiciones de frontera del sistema de evacuación de gases húmedos se muestran a continuación (ver Figura 3.28.):

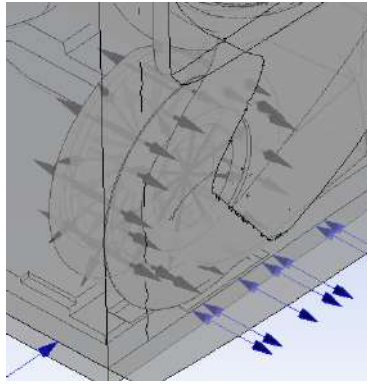


Figura 3.28. Condiciones de frontera de succión y descarga

Fuente de ignición

Se necesita una fuente de calor para que la combustión ocurra, por ello, es necesario añadir un cuerpo con una alta temperatura. En este caso es el encendedor (igniter), un cerámico ubicado a la salida del quemador que, por medio de corriente eléctrica, se calienta a altas temperaturas, actuando como activador para la combustión. En el modelo se definió como una superficie con una temperatura de 2000K.

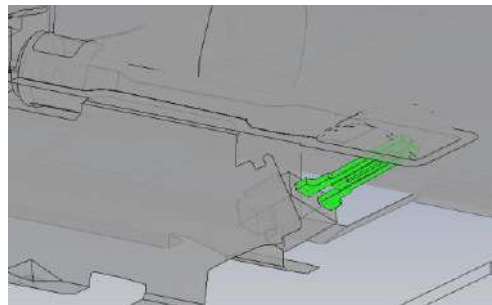


Figura 3.29. Set-up igniter

Criterios de convergencia

Una vez declaradas las condiciones de frontera, se declaran los criterios de convergencia. Debido a que se realizarán 27 simulaciones cada una, en vez de esperar a que los valores RMS pasen por un valor de criterio RMS (usualmente de $1e-4$), se definieron a un número definido de iteraciones. Se observó que, a partir de la iteración 150 se aprecia un periodo de iteraciones donde se muestra cierta estabilidad en el

fenómeno (ver Figura 3.33.). Por cuestiones de tiempo y una cantidad considerable de simulaciones por realizar, el número de iteraciones se limitó a 200.

Basic Settings	Equation Class Settings	Advanced Options
Advection Scheme		
Option	High Resolution	
Turbulence Numerics		
Option	First Order	
Convergence Control		
Min. Iterations	1	
Max. Iterations	200	
Fluid Timescale Control		
Timescale Control	Physical Timescale	
Physical Timescale	0.01 [s]	
Convergence Criteria		
Residual Type	RMS	
Residual Target	1e-4	

Figura 3.30. Criterios de convergencia en la simulación

Puntos de monitoreo

Se definieron 18 puntos de monitoreo de temperatura para comparar resultados y estimar los porcentajes de error tomando como referencia el mallado más denso. Estos puntos de monitoreo coinciden con la prueba estándar de GEA, “drum Inlet”, donde se instrumenta con termopares en las mismas zonas descritas y conocer las temperaturas de entrada. Estos puntos se definieron para poder correlacionar de forma más directa. Teniendo en cuenta que la combustión es un proceso altamente variable en función del tiempo, se utilizaron los datos de las últimas 50 iteraciones.

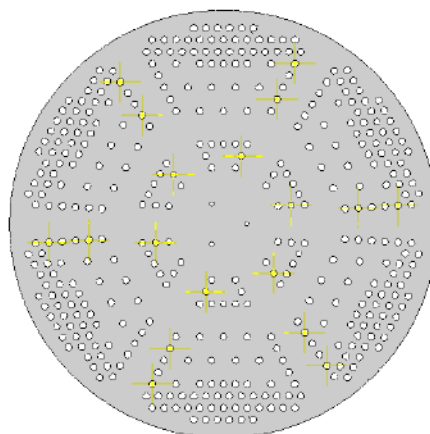


Figura 3.31. puntos de monitoreo de temperatura de difusor.

Solucionador

En la fase del solucionador se realizan los cálculos hasta llegar al criterio de convergencia. Esta fase se realiza en el software CFX-SOLVER. En esta etapa, por medio de métodos numéricos se muestra cómo convergen las variables de simulación en función de las iteraciones en un salto de tiempo especificado. En esta etapa, por medio de puntos de monitoreo, se pueden supervisar y registrar datos de interés como temperaturas, velocidades, flujos, etc. en puntos determinados.

RMS como criterio de convergencia

A continuación, se muestran las gráficas de convergencia de valores RMS de la primera corrida (línea base).

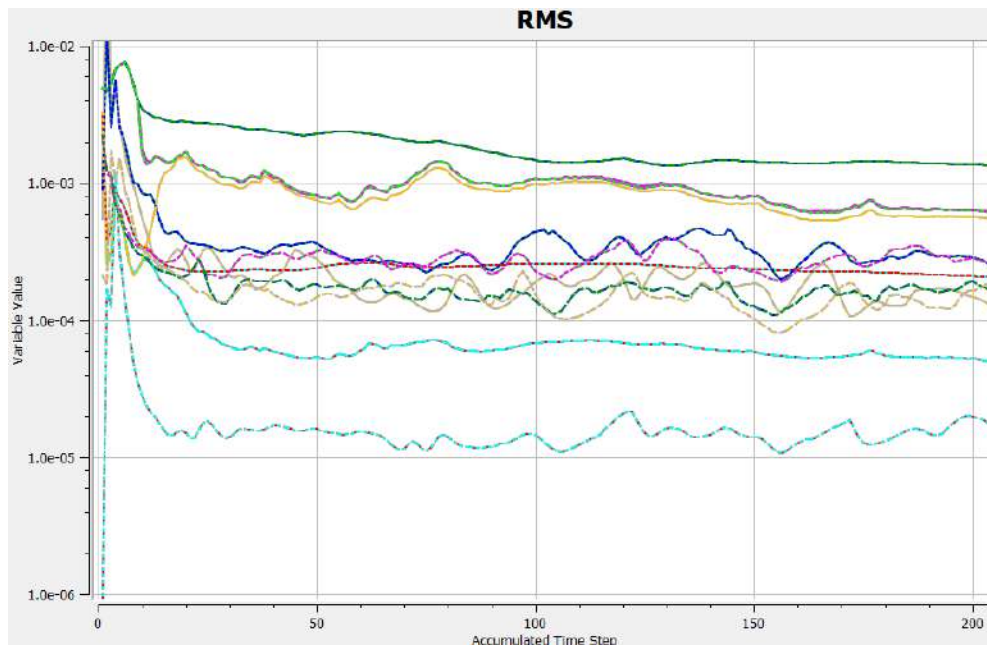


Figura 3.32. Gráficas de errores RMS como criterio de convergencia

Se pueden apreciar líneas prácticamente horizontales a lo largo de las iteraciones, indicando que requiere un largo número de iteraciones para cumplir los criterios de convergencia. A continuación, se muestra la gráfica de puntos de monitoreo a 200 iteraciones en la corrida línea base (Figura 3.33.).

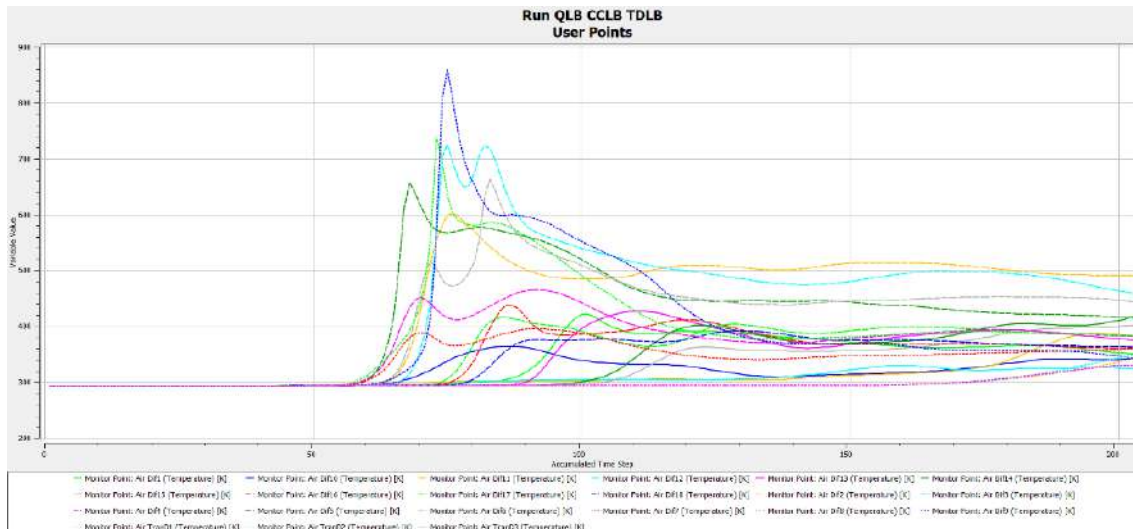


Figura 3.33. Temperaturas de puntos de monitoreo en la entrada de la cámara de secado

Nótese que en las últimas 50 iteraciones se muestra una región relativamente estable, por esta misma razón, se consideraron los datos obtenidos desde la iteración 150 a la 200.

Para el diseño de experimentos se realizó con la configuración mostrada anteriormente. La configuración para el modelo de simulación con fenómenos añadidos se muestra en la etapa de optimización:

Post procesamiento y análisis de resultados

La etapa de post proceso consiste en adquirir un mayor panorama de información de la simulación. Esta fase se realiza en el software CFX-post. Su objetivo es hacer un estudio más extenso de la información generada, mostrando líneas de corriente, perfiles de temperaturas, fracciones de masa, distribución de presiones, etc.

La etapa de análisis de resultados se estudia la información generada para poder correlacionar con mediciones reales y poder validar. Teniendo validado el modelo con un porcentaje de correlación aceptable, se toman decisiones con base a la información analizada. Los resultados de post-procesamiento y análisis de resultados se muestran en el capítulo IV.

3.2.2. Mediciones experimentales

Pruebas a realizar

Mediciones de temperatura

La finalidad de las mediciones de temperaturas es para validar las tendencias de las mediciones numéricas. Y, como información adicional, para seleccionar la mejor combinación. Las mediciones se realizaron siguiendo procedimientos de prueba estandarizados por el equipo de laboratorio de MABE, el ETP drum Inlet.

Las temperaturas se midieron de forma experimental con termopares tipo K ubicados en puntos definidos por el ETP en el difusor de la secadora. La descripción de la instalación de los termopares se muestra en la sección de preparación de unidad de prueba.

Medición de productos de combustión

La medición de productos no es para validar las mediciones numéricas del diseño de experimentos, sino para asegurar que los productos de combustión en las combinaciones probadas estén dentro de especificación. Los productos que se midieron son los siguientes:

- Monóxido de carbono
- Dióxido de carbono
- Porcentaje de oxígeno

La regulación de los productos de combustión es fundamental en cuanto a temas de seguridad del usuario. Una secadora de gas que entregue altas concentraciones de monóxido de carbono puede ser perjudicial para la salud. Una secadora debe asegurar su correcto funcionamiento para salvaguardar la seguridad del usuario.

Preparación de unidad de prueba

Para obtener las mediciones experimentales, se debe preparar el electrodoméstico para que opere de la forma que se requiere. A continuación, se describe el elemento de pruebas y las modificaciones realizadas para correr las pruebas necesarias.

Descripción del producto de prueba

La experimentación se realizó en una secadora de gas natural de 7.5 pies cúbicos de capacidad de secado y control de temperatura electrónico (ver Figura 3.34.), bajo las siguientes condiciones:



Figura 3.34. Secadora de gas GE.

- Colocación de baipás en termostatos y termistores de control de calor y seguridad a excepción del High limit (último nivel de seguridad de la secadora), con la finalidad que la secadora opere con la válvula en flujo continuo y llegue a su estado estable (ver Figura 3.35.).



Figura 3.35. Sistema de control de calor y seguridad de la secadora de ropa deshabilitados

- Ciclo de secado en modo “High heat”
- Se instaló una ventanilla en el panel lateral, para poder visualizar el comportamiento de la flama (ver Figura 3.36).

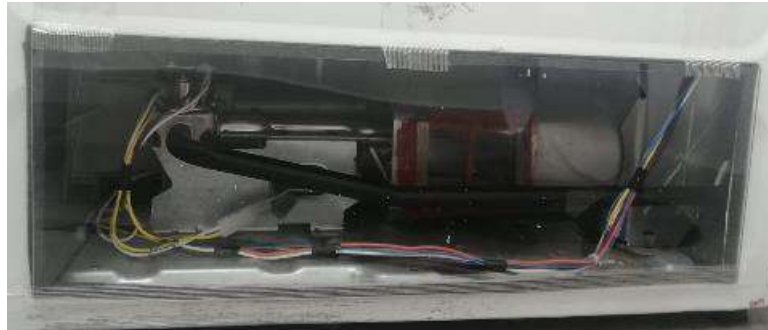


Figura 3.36. ventanilla en costado derecho de secadora de gas

Validación de la línea de gas

Para poder realizar las mediciones, se debe asegurar que la línea de gas esté calibrada para tener certeza que la secadora esté entregando los 22,000 BTU/h. con un porcentaje de error máximo permisible del 5%. Para realizar la medición, se utilizó un medidor de prueba húmedo (wet test meter) (ver Figura 3.37)



Figura 3.37. Medidor de prueba húmedo

Se registró el tiempo en el que el medidor cuente dos vueltas y se añadió en un formato de Excel, además de las condiciones de presión barométrica, temperatura ambiente, temperatura del gas, presión de entrada del gas y tiempo en cumplir 6 litros.

Tabla 3.6. Condiciones de presión, temperatura y entrada de energía de la prueba

Date =	16/03/2023
Design Burner Rating, (Btu/hr)	22000
Barometric Pressure, Pb (in Hg)	24.26
Barometric Temp., Tb (F)	75
Gas Temperature, Tg (F)	72
Gas Pressure at meter inlet, Pg (in. H ₂ O)	7.5
Gas Heating Halue, HHV-wet (Btu/cft) <i>[Need if using a wet test meter]</i>	1020
Gas Heating Value, HHV-dry (Btu/cft) <i>[Need if using a dry or digital flow meter]*</i>	
Gas Volume, V litros	6
Gas Volume, V (cft)	0.2118882
Time for Gas Vol., t (sec)	28.3675
Station Corrected Input rate, (Btu/h) =	21,844.87
Dev. From Rated Input Rate, (%) =	-0.71%
Sea Level Rate, (Btu/h) =	24,477.60

El criterio para aceptar o rechazar el porcentaje de desviación es del 5%. Debido a que hay una variación de 0.71%, se puede llegar a la conclusión que es válido el flujo de gas.

Instrumentación en el difusor

Se instalaron termopares tipo K en el difusor de la secadora de ropa, con la finalidad de medir 9 puntos representativos en tiempo real en un ciclo de carga alta. El diagrama de la instrumentación del difusor se muestra en la sección izquierda de la Figura 3.38., y su instrumentación, se muestra a la derecha.

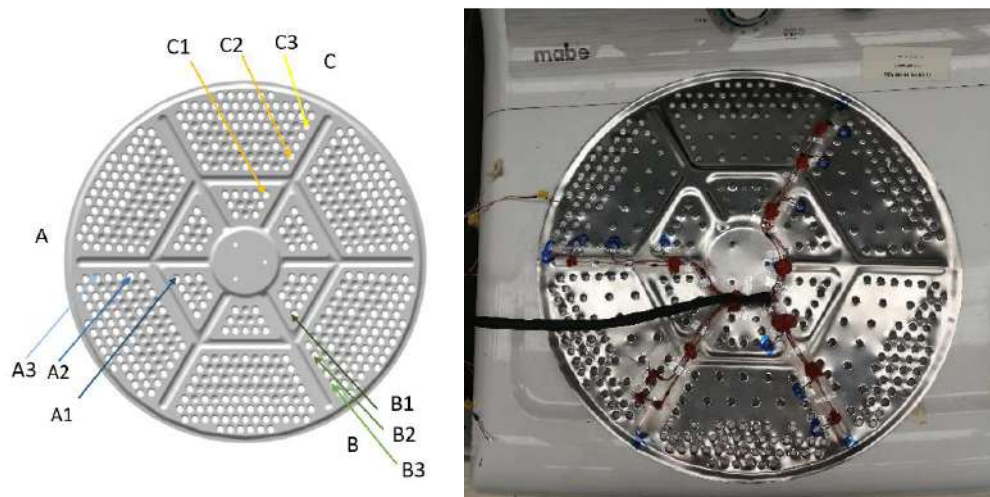


Figura 3.38. Diagrama e instrumentación del difusor

Instalación de eje rotatorio para medición de temperaturas en partes móviles

Los termopares en condiciones normales no pueden registrar mediciones en un componente rotativo debido al enredamiento de los cables. Para ello, se instala un eje hueco en la cámara de secado que sobresale del respaldo de la secadora. Los cables pasan a través del eje. En él, se instala un dispositivo de pistas rotativo para mantener una señal continua en medición de temperatura. Este actúa como extensión para los termopares y evita que los cables roten y se enreden. En la Figura 3.39., se muestra tanto el eje (izquierda) como el dispositivo de pistas rotativo (izquierda).



Figura 3.39. eje instalado en difusor de la cámara de secado y dispositivo de pistas rotativo

El dispositivo, al actuar como extensión, se conecta al módulo de entrada del laboratorio, para que se puedan registrar las temperaturas en una gráfica en función del tiempo. A continuación, en la Figura 3.40., se muestra la conexión de los termopares al módulo de entrada del laboratorio.



Figura 3.40. Conexión termopares a módulo de entrada de termopar

Instalación tubo colector de emisiones

Para realizar mediciones de emisiones se instaló un tubo de cobre en el ducto de transición, el cual redirecciona los gases hacia un analizador de gases. El instrumento es un analizador de gases Testo 340 (ver Figura 3.41.).



Figura 3.41. instalación de tubo colector de gases de combustión e instrumentación

El analizador de gases registra los datos de fracciones de masa y los grafica en función del tiempo. Las gráficas generadas por el analizador de gases se muestran en el capítulo IV.

3.3. Análisis

En la etapa de análisis se estudiaron los datos obtenidos del diseño de experimentos. se busca tener un mejor entendimiento de las variables del sistema de gas de la secadora de ropa, se identificaron las variables que hacen la respuesta más significativa y se descartaron la de menor impacto, las mejores combinaciones se usadas para validarlas de forma experimental. El análisis de los datos obtenidos se muestra en el capítulo IV.

3.4. Diseño

En la etapa de diseño se realizaron prototipos para pruebas experimentales, tomando en cuenta las variables de mayor significancia. Esto con dos motivos: para validar el modelo numérico, y para validar los cambios al diseño de manera virtual.

3.5. Optimización

De las combinaciones que presentaron mejorías respecto a la temperatura, se van a seleccionar las dos mejores opciones, de esta se estudiará el quemador y se buscará optimizar la geometría. Esto buscando maximizar la temperatura de la flama y del difusor, el flujo de aire y la distribución homogénea de la temperatura; además de minimizar emisiones y consumo de combustible.

La etapa de optimización se aplicó también al modelo de simulación. En esta etapa se busca añadir fenómenos que representen un acercamiento al comportamiento real de la secadora de ropa. Esto para obtener herramientas de toma de decisiones en cuestión de diseño orientado al desempeño de la secadora. A continuación, se muestra la exploración de mejora del modelo de simulación.

3.5.1.Exploración del modelo de simulación con fenómenos añadidos

Por cuestiones de tiempo de entrega y el número de simulaciones a realizar para el diseño de experimentos, se realizaron simulaciones simples, considerando combustión, flujo de fluidos, paredes adiabáticas y cámara de secado estática. Sin embargo, para trabajos futuros se busca tener un modelo más complejo que pueda emular de mejor manera el comportamiento de la secadora en cuestión de flujo de fluidos y la combustión, además de considerar conducción en los componentes más relevantes del sistema de gas (quemador, cámara de combustión, ducto de transición, difusor, lámina difusora y difusor de gas).

En el primer modelo se hicieron los siguientes cambios:

Dominios

Se consideraron tres dominios en lugar de uno, como se consideró en el modelo básico de simulación. Los tres dominios son los siguientes:

Dominio de aire

El dominio de aire es el actual, considera la mayoría de volumen de aire de la secadora, a excepción de la parte trasera de la cámara de secado y el envolvente de la cámara de secado. Este dominio se considera estático.

Dominio de baffles rotatorios

Para esta sección, se tomó un volumen de aire circundante para emular la influencia de los baffles en el flujo de aire dentro de la cámara de secado. La velocidad angular de rotación de la cámara de secado es de 49 RPM. La interfaz de interacción de los baffles se definió del dominio de aire al dominio de los baffles rotatorios. A continuación, en la Figura 3.42. Se muestra el envolvente de la zona del cámara de secado y el difusor de gas.



Figura 3.42. envolvente móvil

Dominio de entrada a la cámara de secado

La cámara de secado trasero también se considera una sección rotatoria a 49 RPM, al tener componentes como el difusor y la cámara de secado trasero, también influyen

en el flujo de aire. Su interfaz es del dominio de aire hasta el dominio de la parte trasera de la cámara de secado. El dominio de la cámara de secado trasero se muestra en la Figura 3.43

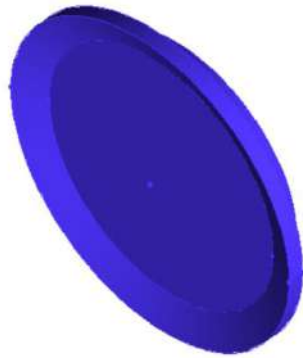


Figura 3.43. Envolvente de la cámara de secado trasero

La vista interior de la secadora con las modificaciones se muestra en la Figura 3.44.

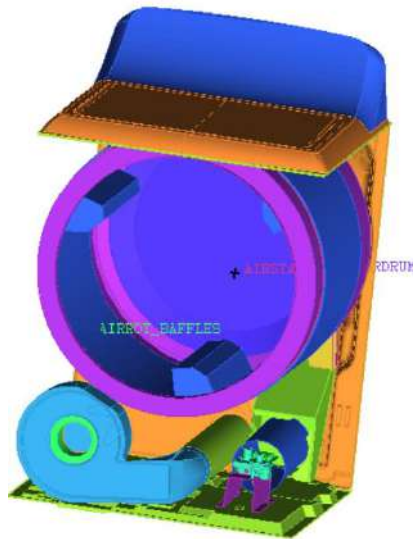


Figura 3.44. Geometría actualizada de la secadora, vista interior

Modificaciones del nuevo modelo

Para ahorrar elementos, se eliminó el volumen de aire ubicado en la sección trasera de la secadora, esto añadiendo secciones de apertura en los louvers de la secadora. Como se muestra en la Figura 3.45., las zonas de color amarillo son las entradas de aire del ambiente al sistema.

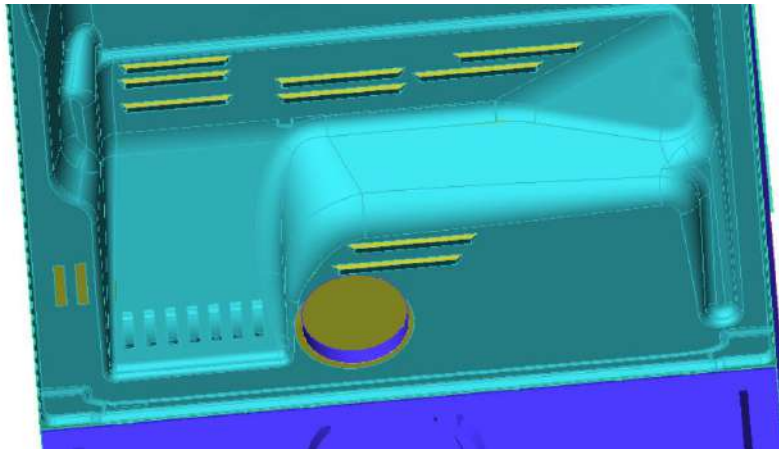


Figura 3.45. modificación de entrada de aire al nuevo modelo

El nuevo modelo se muestra en la Figura 3.46.

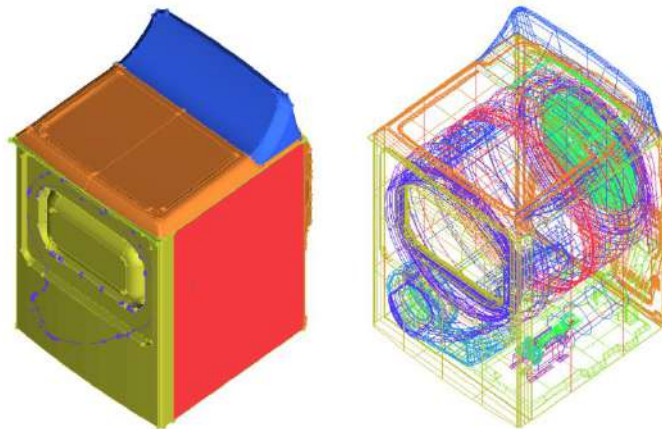


Figura 3.46. Nuevo modelo de secadora

Fenómeno de conducción

Se añadió conducción en el nuevo modelo para obtener más información respecto a las temperaturas superficiales de los componentes. Para ello, en la etapa de

preproceso en los componentes desde el quemador hasta el difusor de gas se les asignó un espesor artificial (al haberse simplificado de elementos de pared delgada a superficies sin espesor), para que el software realice un promedio de la temperatura superficial. Para ello, se generó una interfaz de dominio, considerando la interacción de la cara interna del cuerpo con su cara externa. Se consideró una pared lisa, sin rugosidad. El espesor se obtuvo de la base de datos original de la secadora.

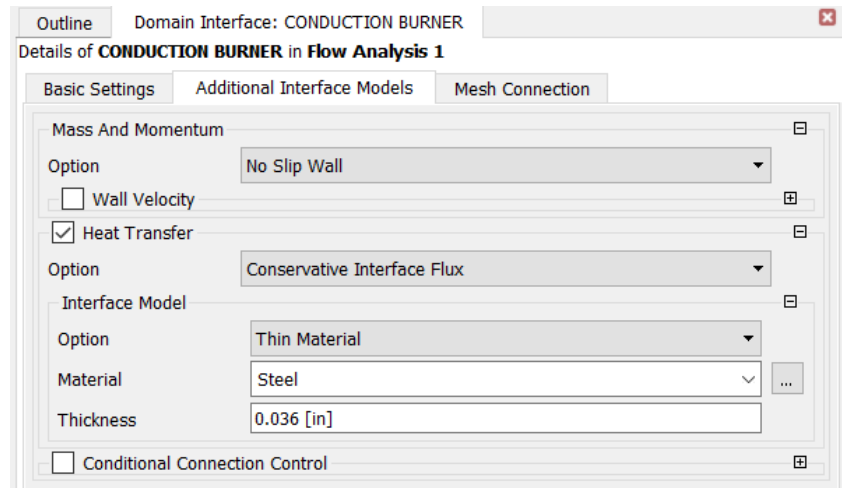


Figura 3.47. Consideración de fenómeno de conducción

Análisis de independencia de malla

El análisis de independencia de malla se realizó para poder determinar dónde es más conveniente tener una densidad de malla mayor sin sacrificar poder computacional. El estudio de mallado se muestra a continuación:

Selección de mejor opción de malla

Set up de malla

Se consideró un set-up de tamaño de malla considerando diferentes tamaños de malla en los componentes críticos de la secadora. Estos siendo la cámara de combustión, el ducto de transición y el difusor de gas. Estos elementos se muestran en la Figura 3.48



Figura 3.48. Cámara de combustión (azul), ducto de transición (verde) y difusor de gas (morado).

Para el tamaño de elemento, se consideraron tanto la cámara de combustión como el ducto de transición como un solo elemento. Mientras que el difusor de gas se considerará como otro elemento. Para incrementar la densidad de malla, se trazaron líneas en los componentes con espaciamiento del tamaño de elemento deseado.

En la Tabla 3.7 se muestran los parámetros utilizados en el análisis de independencia de malla, donde los valores están dados en pulgadas y se define si se utilizó una estructuración.

Tabla 3.7. Parámetros de tamaño de elemento en componente

Caso	Cámara de combustión	Ducto de transición	Difusor de gas	# elementos (millones)
1	0.01 E	0.01 E	0.01 E	11.6
2	0.005 E	0.005 E	0.01 E	13.22
3	0.015 N/E	0.015 E	0.005 E	13.18

En la Figura 3.49. se muestra un plano de sección del quemador, cámara de combustión y difusor de gas en los tres casos.

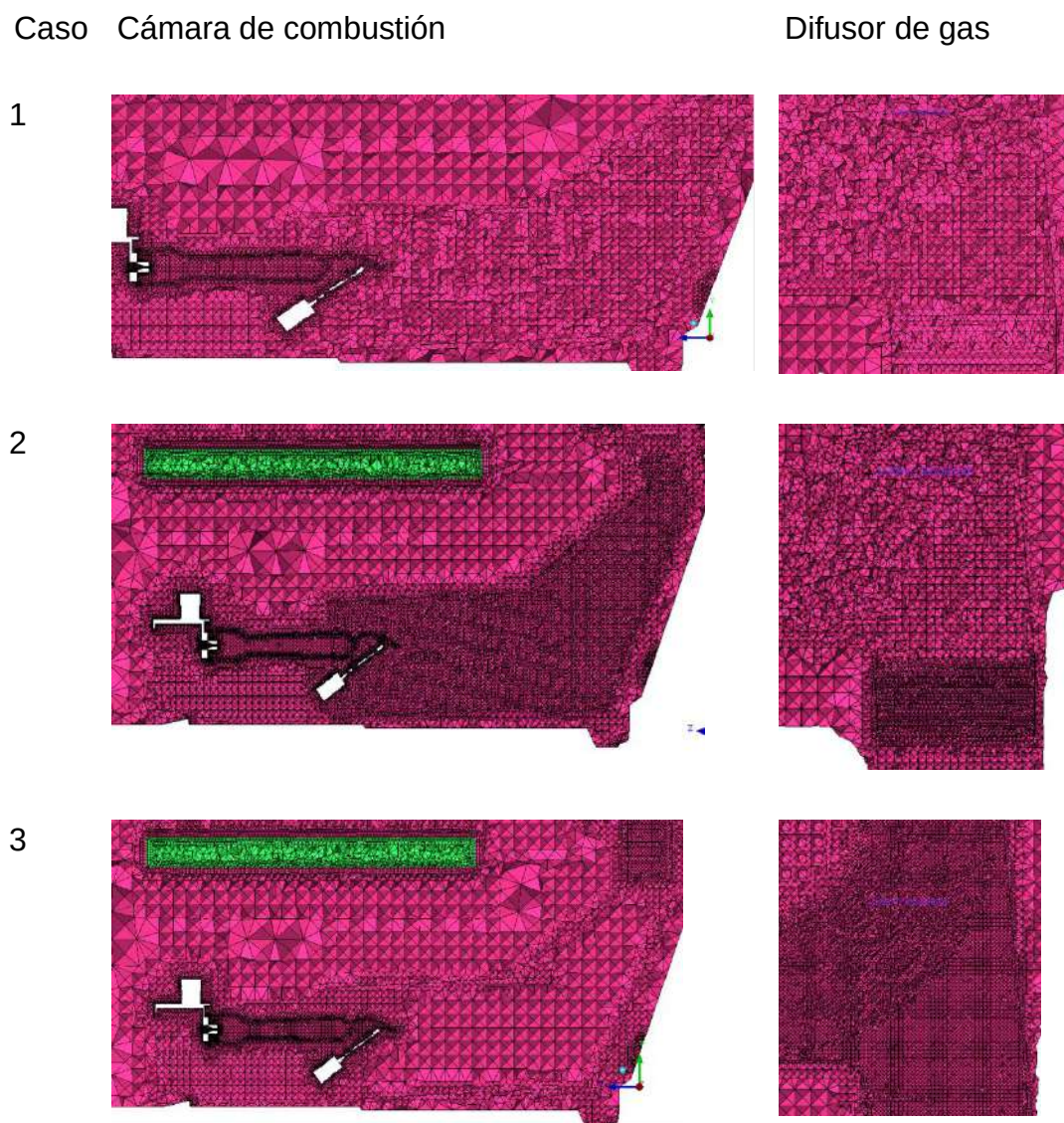


Figura 3.49. Comparación de casos de malla

Análisis de imbalance y criterios de convergencia

Se corrieron los tres tipos de malla con un criterio de convergencia de imbalance del $\pm 10\%$, analizando 10 puntos de monitoreo añadidos en la cámara de combustión. El

número máximo de iteraciones se definió en 1600. A continuación, se muestra una comparación de los tres casos en sus gráficas de imbalance:

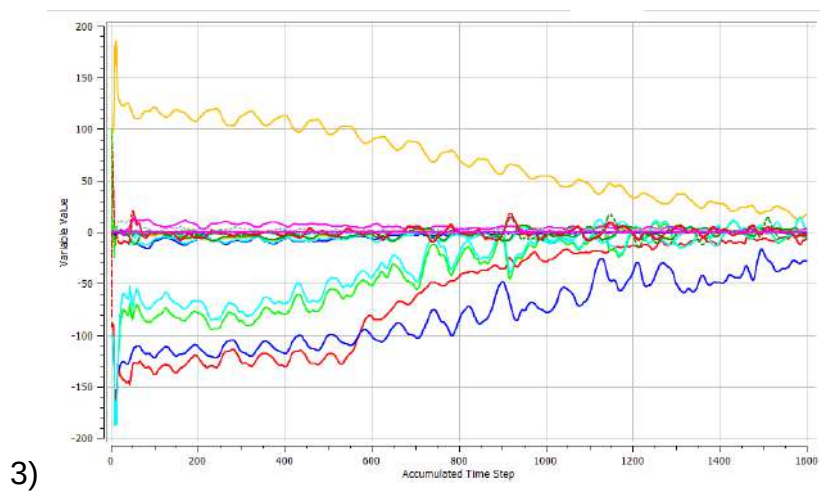
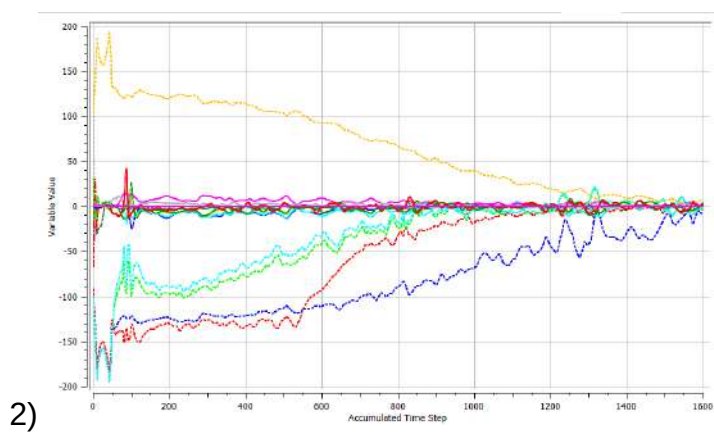
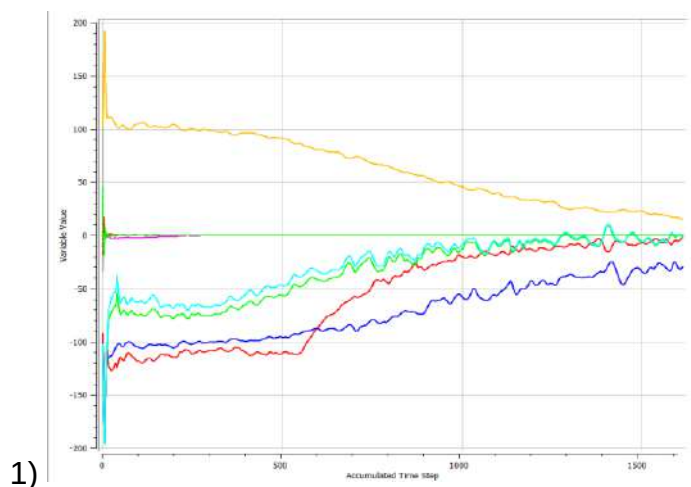


Figura 3.50. Imbalances de los tres casos a analizar

Como se puede ver en la Figura 3.50., el caso dos muestra una convergencia más adecuada, mientras que el caso uno y tres se observa que tiene que converger en más iteraciones.

Comparación temperaturas

Se añadieron 10 puntos de monitoreo en la cámara de combustión para estudiar la variación entre los casos (ver Figura 3.51.).

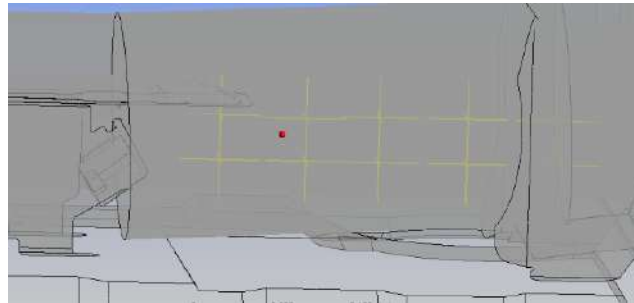


Figura 3.51. Puntos de monitoreo en Cámara de combustión

A continuación, en la Figura 3.52. se muestra una gráfica que compara los tres casos de malla. Como se puede apreciar, el caso tres en los puntos de temperatura de flama adiabática (TFA) de número 2, 4, 5, 6 y 7 se muestra una clara desviación respecto a la uno y dos.

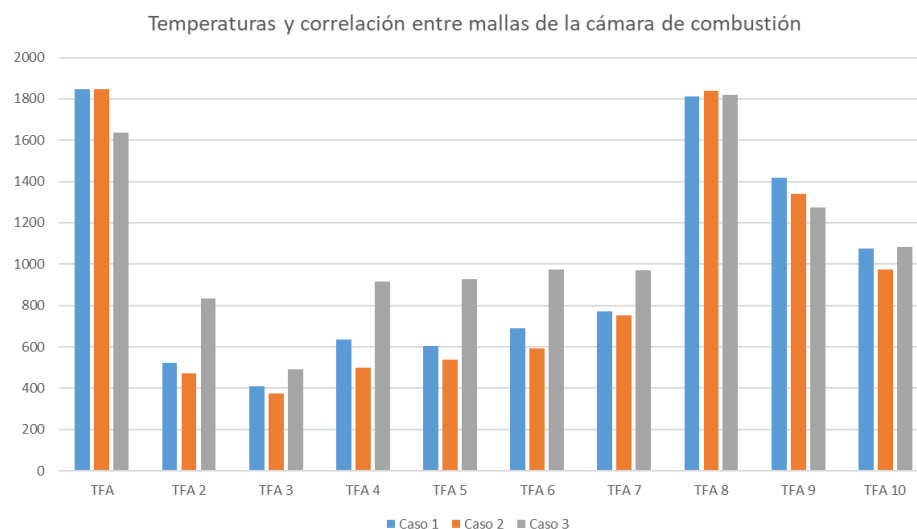


Figura 3.52. Comparación de temperaturas entre diferentes tipos de malla

Debido a que es el modelo que llega a la convergencia de mejor manera de los tres, el caso dos se seleccionó para el modelo avanzado de simulación.

El mallado del caso dos se muestra en la Figura 3.53.

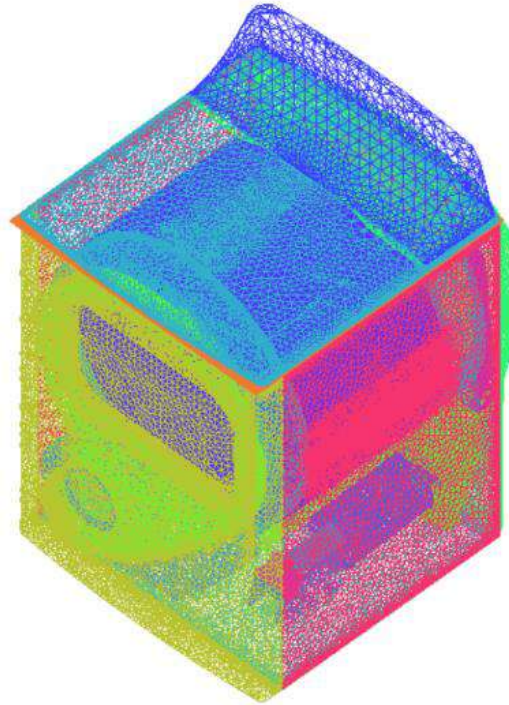


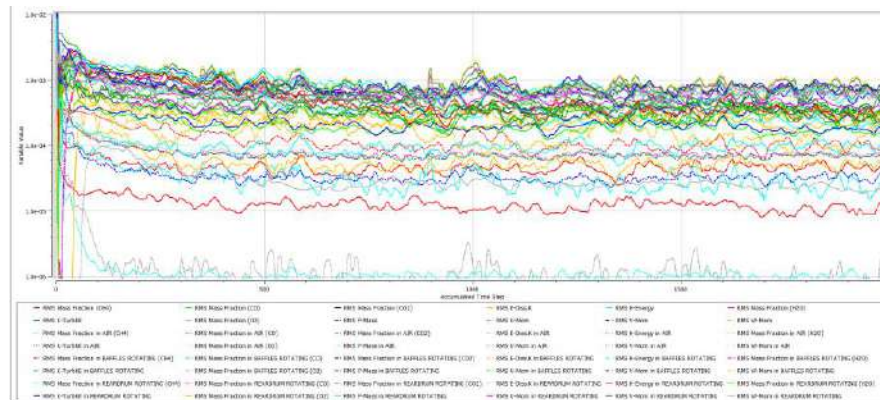
Figura 3.53. Mallado de modelo mejorado de simulación

Etapas de solver con optimización de malla

Una vez seleccionada la mejor opción de malla, la simulación se incrementó a 2000 iteraciones. En esta sección, se muestran las gráficas generadas en el solver:

Convergencia

Se ejecutó la simulación observando la tendencia de los valores RMS con un criterio de convergencia de $1e-4$. Sin embargo, en todas las ecuaciones que gobiernan el modelo se estancan aproximadamente después de las 500 iteraciones. A continuación, se muestran las gráficas de valores RMS (ver **Error! Reference source not found.**).



Al ser un fenómeno altamente variable, no se puede llegar a un criterio de convergencia. Por lo que, para este caso, se consideran los imbalances. Los imbalances se muestran en la Figura 4.1.

Se observa que la variable que más fluctúa es la el imbalance de fracción de masa de dióxido de carbono en el aire.

Puntos de monitoreo

Cámara de combustión

Observando la variación de temperaturas de la cámara de combustión en función de las iteraciones, se muestran fluctuaciones de temperatura muy amplias. A continuación, en la **Error! Reference source not found.**, se muestra la variación de temperaturas de la cámara de combustión.

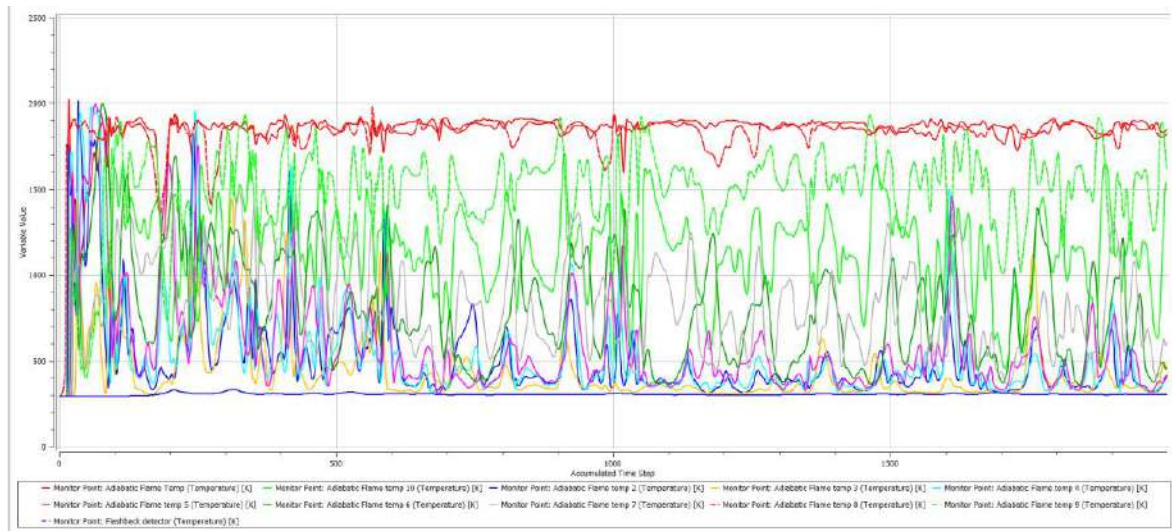


Figura 4.2. Fluctuación de temperaturas en cámara de combustión

Se puede observar una línea prácticamente horizontal a temperatura ambiente, dicha línea representa un punto de monitoreo ubicado dentro del quemador. Su función principal consiste en detectar el fenómeno de flashback. En caso de que la temperatura incremente significa la presencia de combustión dentro del quemador, el cual es un fenómeno no deseable.

Entrada de la cámara de secado

A continuación, se muestran las temperaturas registradas en los puntos de monitoreo del modelo de simulación (ver Figura 4.3.):

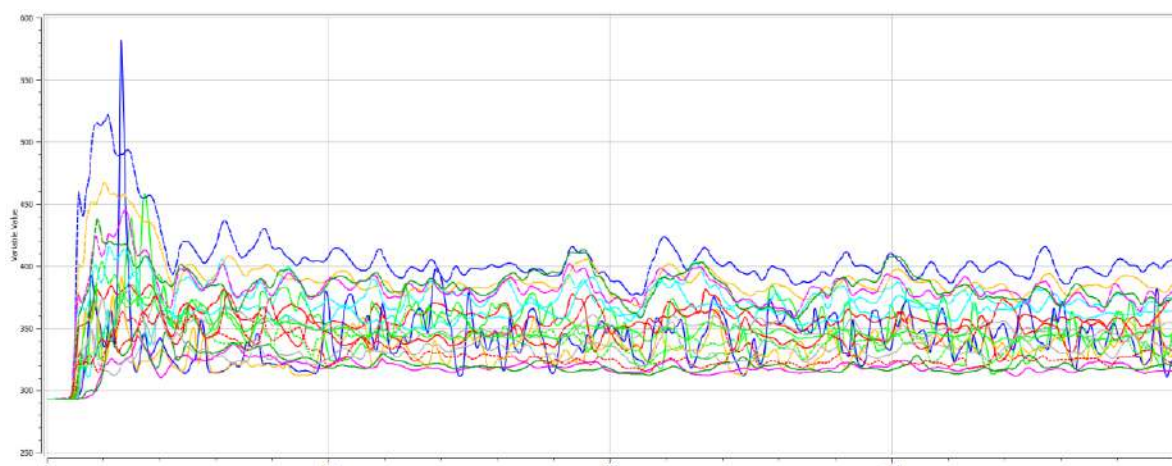


Figura 4.3. Temperaturas de entrada de la cámara de secado

Fracciones de masa

A continuación, se muestra la gráfica de fracciones de masa de monóxido de carbono, dióxido de carbono, y agua (ver Figura 4.4.).

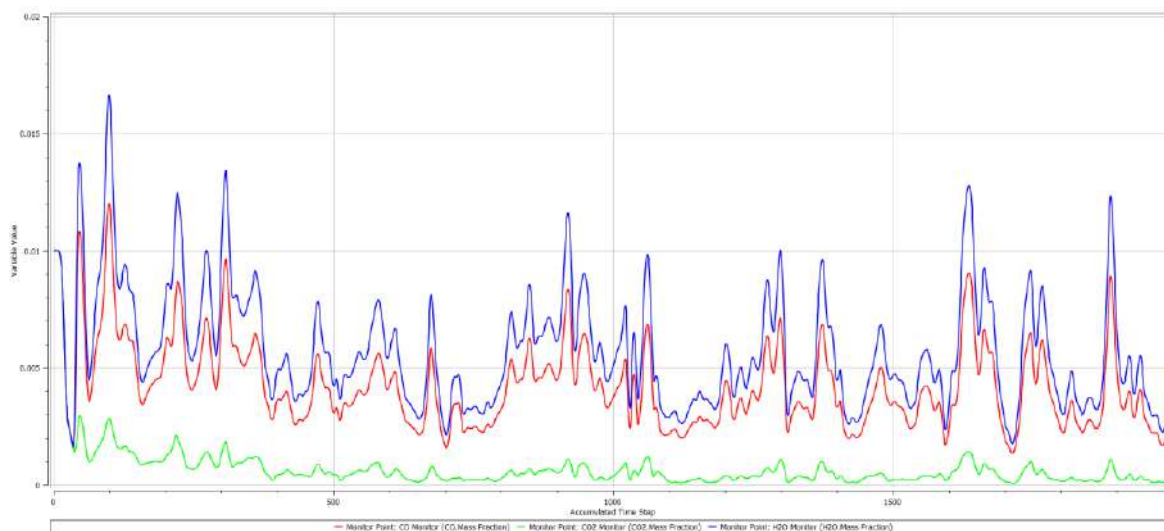


Figura 4.4. fluctuación de emisiones en simulación

3.6. Validación

En la etapa de validación se vuelven a correr las pruebas con el sistema optimizado y se valida el incremento de temperatura y el funcionamiento correcto de la secadora. El correcto funcionamiento de la secadora se rige por documentación como la norma ANSI Z21.5.1, el documento “Standard Instruction” de GE y sus procedimientos de pruebas de ingeniería. Todo para validar que los cambios al sistema de gas cumplan con pruebas de confiabilidad, seguridad y desempeño. Esta serie de pruebas que conforman la fase se hace de manera experimental siguiendo las normas en un laboratorio con presión a nivel de mar.

Para el modelo de simulación optimizado, se hace una comparación a las mediciones experimentales y se buscan correlacionar directamente. Los resultados de la validación se muestran en el capítulo IV

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados del diseño de experimentos

A continuación, se muestran los resultados análisis para la selección del mejor concepto de diseño. Principalmente se muestran los resultados del diseño de experimentos numéricos, y como soporte y validación de las tendencias comportamiento, se muestran los resultados experimentales.

4.1.1. Selección de concepto con base a resultados numéricos

Los resultados de las 27 corridas del diseño de experimentos se muestran en el anexo C. Se compararon las siguientes variables: 1. temperatura de flama adiabática, 2. temperatura promedio del difusor de gas, 3. desviación estándar de la temperatura del difusor de gas, 4. temperatura máxima, 5. temperatura mínima y 6. calidad de la flama. La calidad de la flama se dividió en dos posibilidades: flama corta o flama larga (ver Figura 4.5.). Por temas de seguridad se descartaron todas las combinaciones que presenten flama larga. El análisis de la información se basó en una segregación en comparación con los datos de línea base. Toda combinación que tuviera un valor inferior en cualquier categoría a la línea base se descartó. De esta forma se redujo la cantidad de pruebas experimentales.

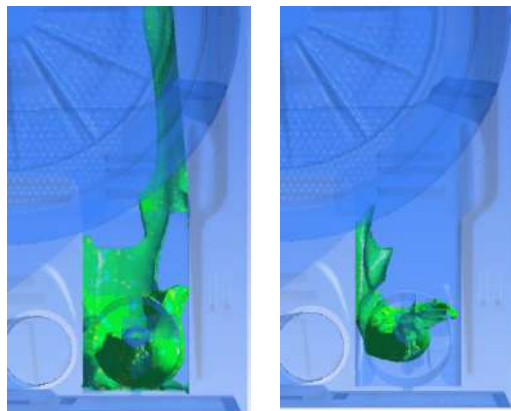


Figura 4.5. Flama larga y corta

Teniendo en consideración las variables utilizadas, se muestran 9 combinaciones variando ducto de transición y quemador (ver Figura 4.6.):

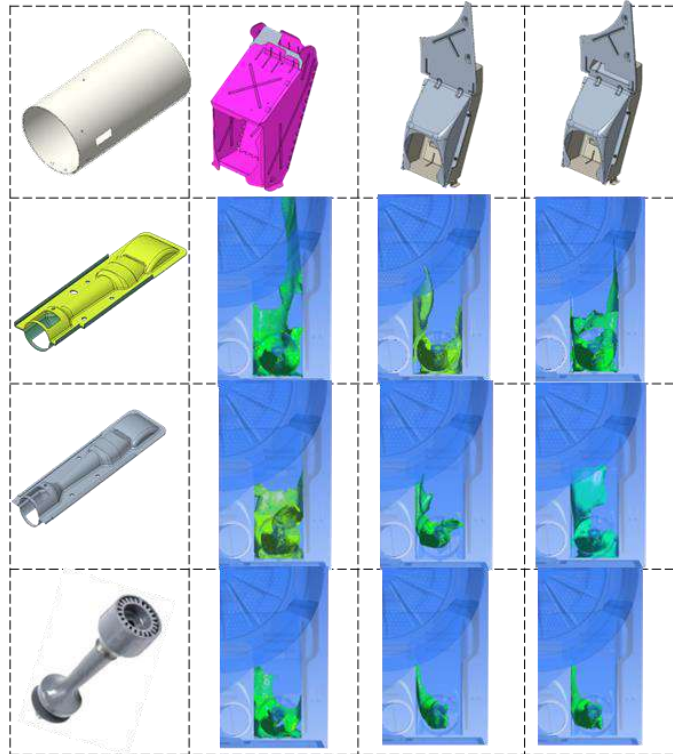


Figura 4.6. Longitud de flama en 9 combinaciones con misma cámara de combustión

Como se puede observar en la Figura 4.6, en el ducto de transición línea base se ve una tendencia a flamas alargadas, mientras que en los otros ductos de transición se ve una flama relativamente corta.

En la Figura 4.7. se muestra una comparación de esas mismas nueve combinaciones, mostrando el impacto en temperatura en la cámara de secado. En la figura se muestra una función de renderizado 3D, su función es mostrar las zonas con altas temperaturas de forma que presenten un color opaco. En el ducto de transición actual, en la cámara de secado se muestran colores transparentes, indicando bajas temperaturas. Esto indica un desaprovechamiento de calor hacia la cámara de secado, por consiguiente, un bajo desempeño. También en las dos alternativas del quemador se puede apreciar una mejora respecto al quemador actual.

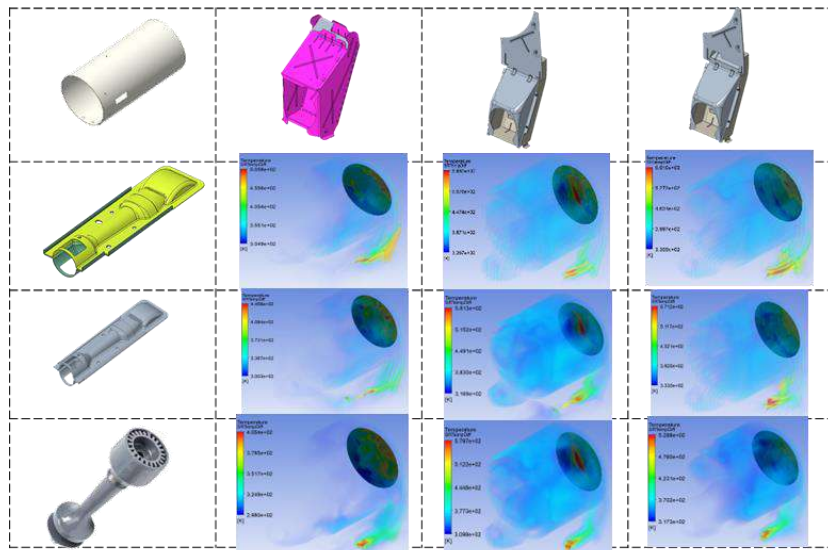
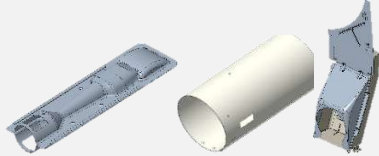
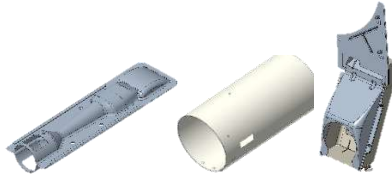


Figura 4.7. Comparación de 9 corridas en impacto en temperaturas en la cámara de secado

Se realizó el mismo análisis con el resto de las combinaciones y se encontraron observaciones, el cual se reportan en las conclusiones. Analizando temperaturas, forma de flama y distribución de calor se segregan las combinaciones que mostraron una mejora respecto a línea base. Todas las combinaciones que presentaron dichas mejoras respecto a la línea base se muestran en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Mejores combinaciones del diseño de experimentos.

#	Componentes	#	Componentes
6		14	
9		15	

11		21	
12		24	

Se seleccionaron 8 combinaciones como posibles candidatos para el sistema de gas, debido a las simplificaciones consideradas en la simulación y el número reducido de iteraciones, no es viable realizar una correlación con datos puntuales. Por ello, se validó el diseño de experimentos observando si los datos experimentales muestran un incremento o decremento en las temperaturas del difusor con las combinaciones ganadoras. Por decisión de diseño orientado a temas de manufactura, costo y ensamble, la combinación 9 se descartó. El arremolinador no muestra mejoras significativas que justifiquen su implementación. Por ello, solo se mostrarán las mediciones experimentales con 7 de las combinaciones seleccionadas, además de la línea base.

4.1.2. Selección de concepto con base a resultados experimentales

Temperatura

Se realizaron las pruebas en la unidad bajo las siguientes condiciones:

- Sin carga de ropa
- Sin restricciones en el escape
- Baipás en sistemas de control y seguridad para asegurar condiciones de flujo estable

La duración de cada prueba fue de 20 minutos, y se consideró un promedio de temperaturas en los últimos 5 minutos de la prueba. Los resultados se muestran a continuación:

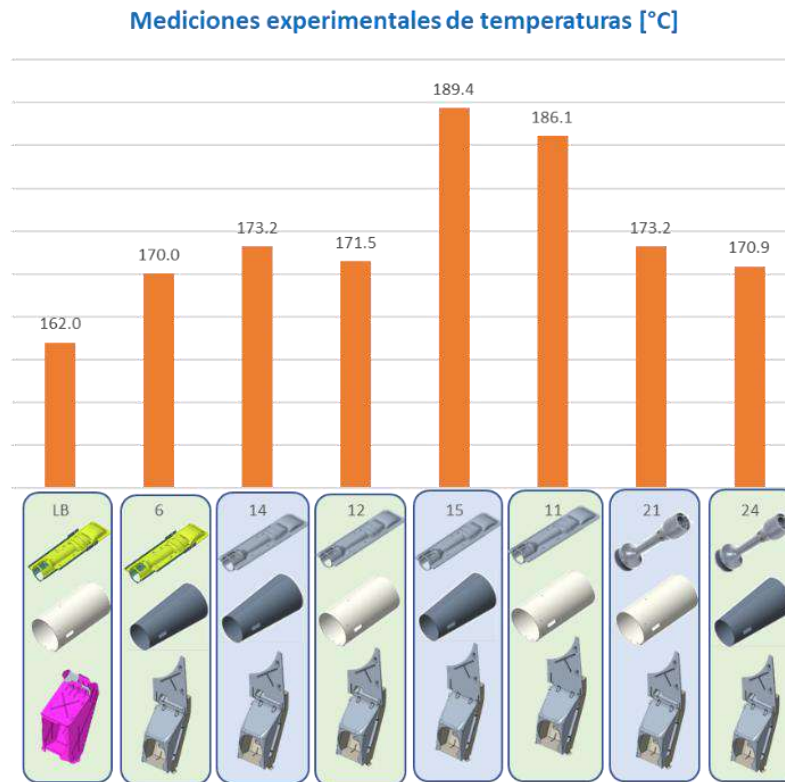


Figura 4.8. Resultados experimentales de temperaturas del difusor del diseño de experimentos.

Las pruebas fueron acomodadas de tal forma que se puedan comparar las cámaras de combustión. Como se ve en la Figura 4.8., las combinaciones cuya diferencia es la cámara de combustión muestran similitudes en temperatura. Contrastando la combinación 14 y 12, la 14 muestra una mejora de 3.2 °C respecto a la 12; o la combinación 15 muestra un incremento de 3.3°C respecto a la combinación 11. La única excepción a esta tendencia es la combinación 21 con la 24, una posible explicación de este comportamiento es debido a la obstrucción del quemador en la cámara de combustión, generando una combustión con falta de aire.

Emisiones

A continuación, se muestran las mediciones experimentales de emisiones de las combinaciones seleccionadas por el diseño de experimentos (ver Figura 4.9.).

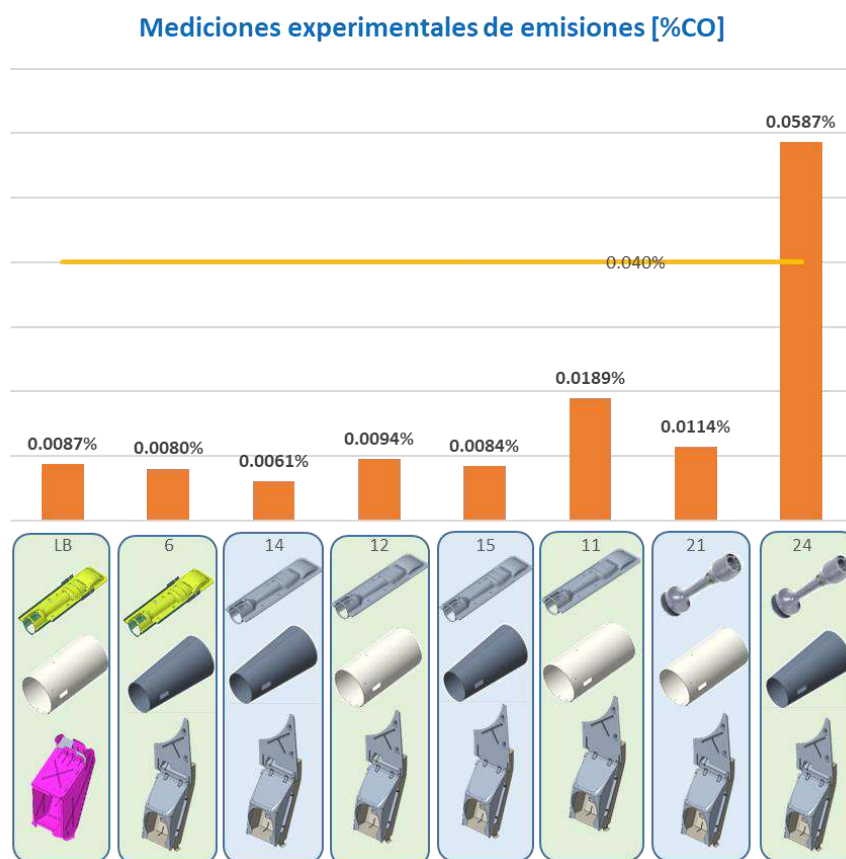


Figura 4.9. Porcentaje de emisiones de CO en combinaciones seleccionadas de DOE

Por normatividad, el porcentaje masa de monóxido de carbono no puede superar el 0.040%, el cual todas las combinaciones a excepción de la 24 cumplen. La diferencia entre la cámara de combustión entre la combinación 21 y 24 refuerzan más la hipótesis de la obstrucción de aire secundario a causa del quemador y el decremento de área de la cámara de combustión.

4.1.3. Concepto final de diseño

Tras el filtrado del diseño numérico y los datos experimentales, se llegó a la conclusión que la combinación 15 es la que presenta una mejor temperatura a la entrada de la

cámara de secado. Sin embargo, la combinación 11 presenta resultados similares al 15. Viéndolo desde un punto de vista de decisión del negocio, realizar cambio de componentes requiere una inversión fuerte en diseño y fabricación de nuevos herramentales para cambiar la línea de producción, además del posible incremento del costo que representa una cámara de geometría más complicada. El concepto final de diseño (para el alcance de la presente tesis) se muestra en la Figura 4.10.



Figura 4.10. Concepto final de diseño

4.2. Condiciones de diseño que mejoran el desempeño del producto

A continuación, se muestra una comparativa entre la línea base y el nuevo concepto de diseño

4.2.1. Flujo de mezcla

La observación del comportamiento del flujo desde el quemador, hasta la cámara de secado es importante para identificar posibles anomalías, infiltraciones, recirculamientos, etc. A continuación, se muestra la línea de flujo del concepto de diseño línea base y el nuevo concepto:

Vectores de velocidad

Como se muestra en la Figura 4.11., en la combinación seleccionada presenta un flujo de mezcla más ordenado, siguiendo una trayectoria continua hasta la cámara de secado, mientras que, en la línea base, se muestra un recirculamiento de la mezcla que puede deberse a la holgura entre ducto de transición y la cámara de combustión.

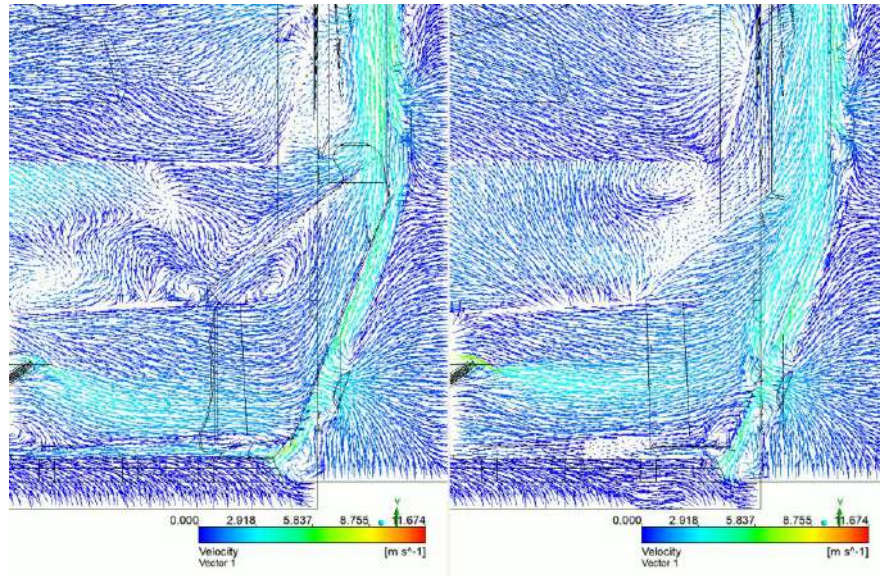


Figura 4.11. Vectores de velocidad en sistema de combustión línea base (izquierda) y nuevo concepto de diseño (derecha)

Línea de flujo

Como se muestra en la Figura 4.12, la línea de flujo del nuevo concepto de diseño presenta un movimiento más suave del quemador a la entrada de la cámara de secado que en la línea base, además de mostrar una mejor distribución de flujo en la cámara de secado, esto es debido a la consideración de rotación en la cámara de secado.

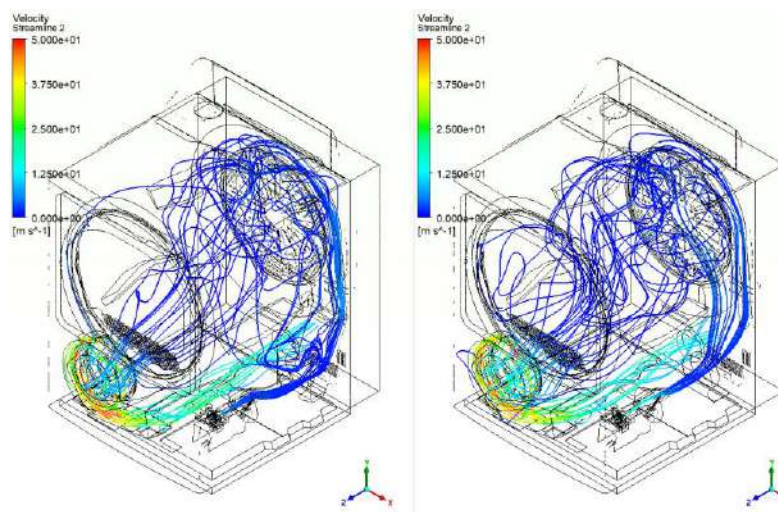


Figura 4.12. Comparación de flujo entre concepto línea base (izquierda) y nuevo concepto de diseño (derecha)

4.2.2. Temperatura

A continuación, se muestra una comparación respecto a la distribución de temperatura y forma de flama:

Flama

Para estudiar la flama, se realizó una isosuperficie a 700K, y se muestra un alargamiento de flujo en la línea base, mientras que, en la combinación seleccionada, la flama se concentra en la cámara de combustión y el ducto de transición.

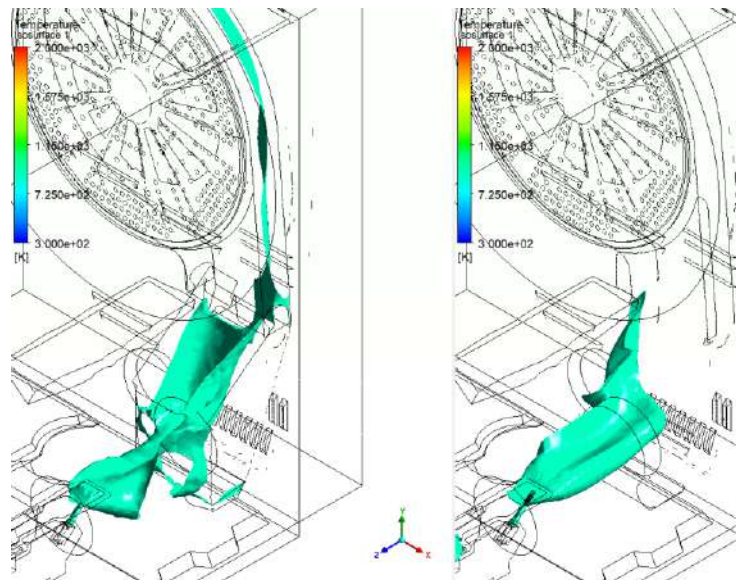


Figura 4.13. longitud de flama de línea base (izquierda) y combinación 11

Sistema de combustión

A continuación, se muestra la comparación de temperaturas en el sistema de combustión. En la línea base, se muestra una fuga de gases caliente en el recirculamiento observado en los vectores de velocidad, esto puede significar un mayor consumo de energía para incrementar la temperatura de los gases.

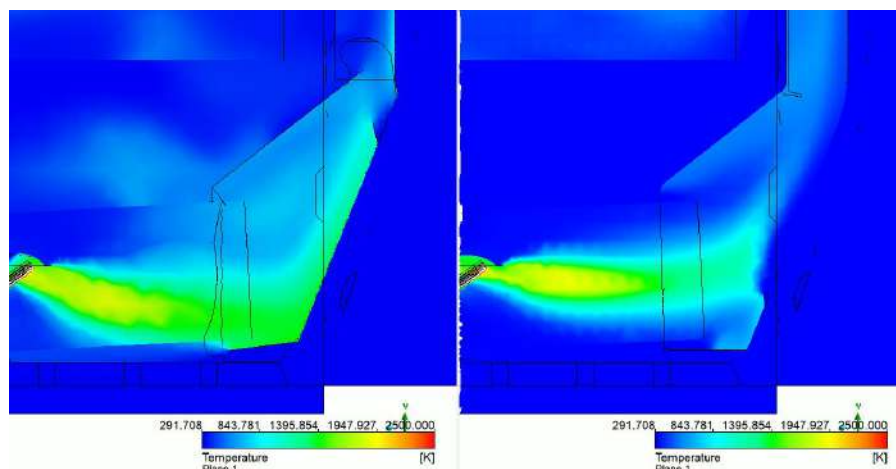


Figura 4.14. Perfil de temperaturas en sistema de combustión y cámara de secado en línea base (izquierda) y combinación 11 (derecha)

Difusor

Como se muestra en la Figura 4.15, el difusor de la combinación seleccionada muestra mayores temperaturas, mostrando un incremento considerable para los gases a la entrada de la cámara de secado.

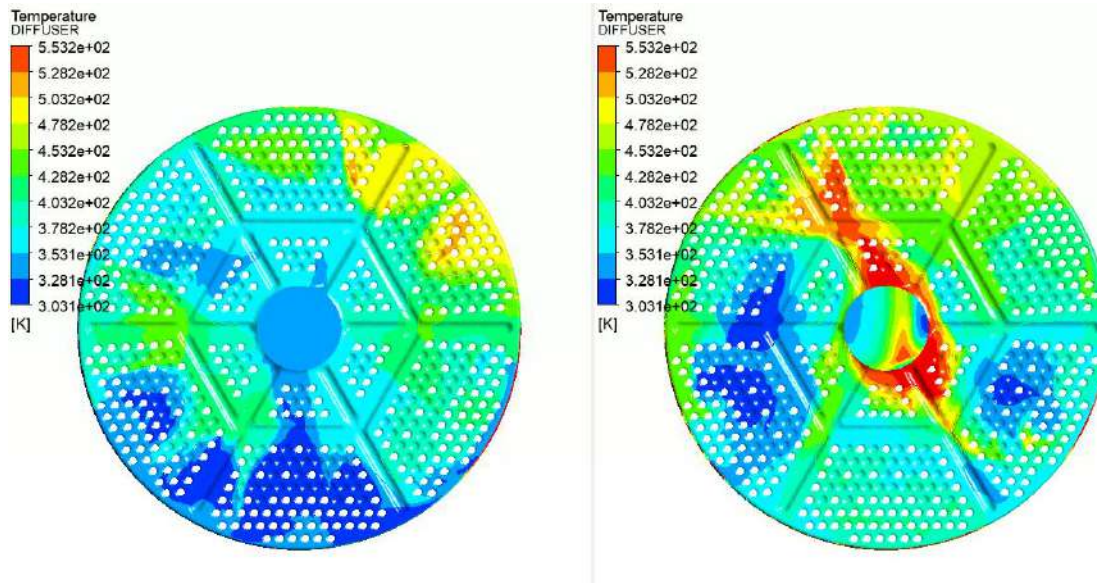


Figura 4.15. Comparación difusores línea base y nuevo concepto de diseño

4.3. Resultados del modelo avanzado de simulación

Los resultados del modelo avanzado de simulación se muestran a continuación. Estos resultados se contrastan con los resultados obtenidos con el modelo de simulación base utilizado en el diseño de experimentos, además de mediciones experimentales.

4.3.1. Velocidad

Vectores de velocidad

Los vectores de velocidad se muestran a continuación. Como se puede notar, ambos modelos coinciden en el Recirculamiento en la holgura de la cámara de combustión y ducto de transición. Aun así, el flujo en el modelo optimizado parece tener una trayectoria más definida que en modelo del diseño de experimentos. Esto sucede debido a la succión causada por la adición de la rotación en la entrada de la cámara de secado y los baffles.

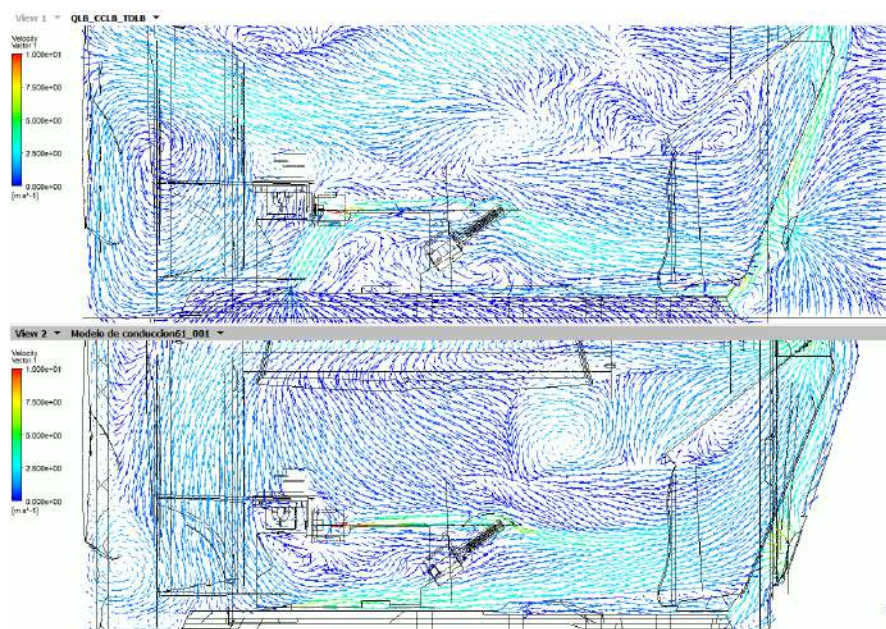


Figura 4. 16. Líneas de sistemas de combustión entre modelo base y optimizado

Líneas de flujo

A continuación, se muestran las líneas de flujo del modelo optimizado y el modelo línea base. Se puede mostrar una distribución más uniforme de flujo en la cámara de

secado, mostrando una gran diferencia entre el comportamiento de flujo rotativo y estático.

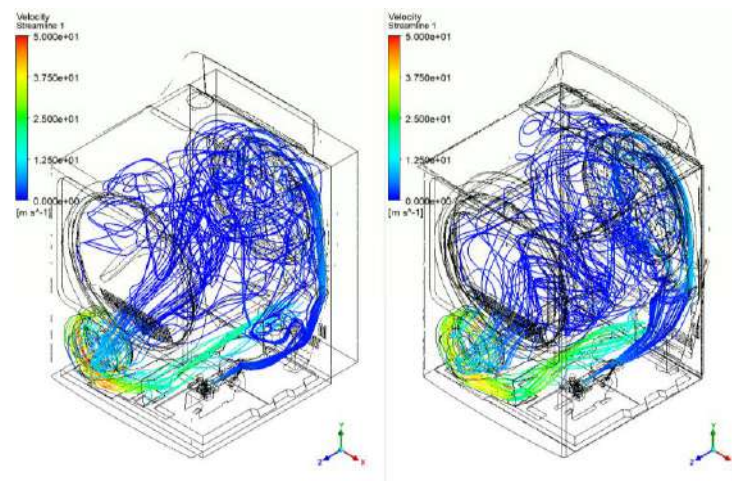


Figura 4.17. Líneas de flujo del modelo línea base (izquierda) y el modelo optimizado (derecha)

4.3.2. Cámara de secado

A continuación, en la Figura 4.18. se muestra la distribución de temperatura en la cámara de secado. en la cámara, se muestra una temperatura con mayor uniformidad en el modelo optimizado, en comparación al modelo base.

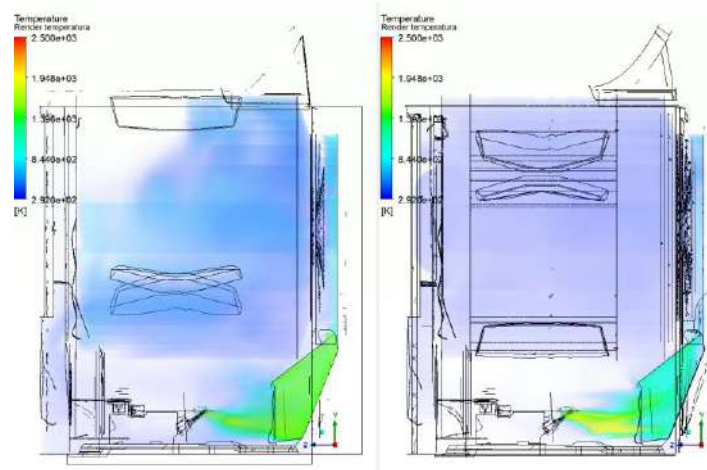
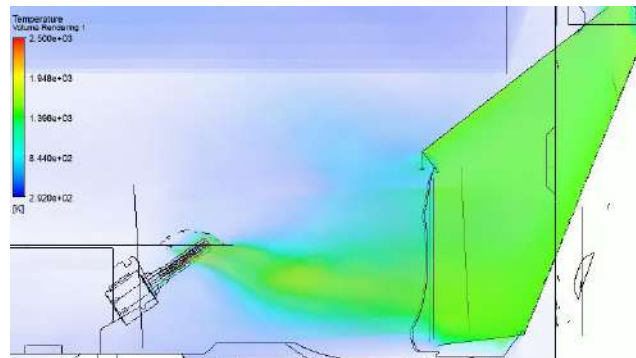


Figura 4.18. Comparación de temperaturas cámara de secado entre modelo línea base (izquierda) y el modelo optimizado (derecha)

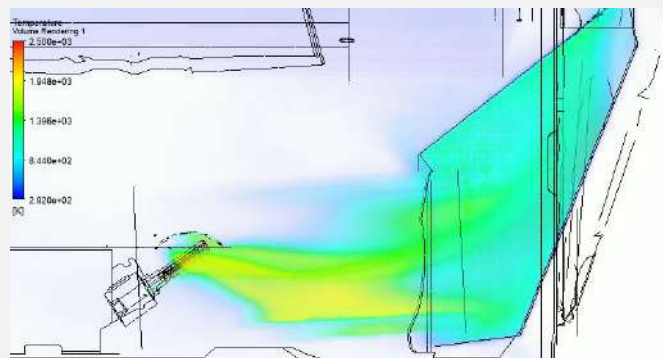
4.3.3. Sistema de combustión

Utilizando una cámara de combustión con una ventana a un costado, se pudo observar el comportamiento de la flama. Se muestra que la flama al salir del quemador el flujo se divide en dos corrientes de gas separadas. Observando ambos modelos numéricos, especialmente en el modelo optimizado se observa un comportamiento similar en la línea de flujo en la simulación, mostrando una división a dos flujos con su forma característica de la flama.

Modelo base



Modelo optimizado



Experimentación



Figura 4.19. Comparación entre modelo base, optimizado y mediciones experimentales

4.3.4. Perfil de temperaturas

Como exploración a la adición del modelo de conducción en los componentes principales del sistema de conducción, se hicieron comparaciones mediante huellas de degradación mostradas en piezas sometidas a altos tiempos de operación. Estas degradaciones se presentan en forma de decoloración o incluso corrosión en las piezas. Mientras mayor es la decoloración o corrosión, a mayores temperaturas fue sometida la pieza. A continuación, se muestran comparaciones de perfil de temperaturas entre dichas piezas y el modelo de simulación:

Quemador

Para determinar si la distribución de calor que reporta el modelo de simulación en el quemador se acerca a la realidad, se comparó con un quemador sometido a años de uso continuo. Como se muestra en la Figura 4.20., la corrosión mostrada en la punta del quemador degradado es idéntica a zona de altas temperaturas del modelo de simulación optimizado. En el modelo base no se considera conducción, por lo que se reporta la temperatura del elemento más cercano a la pared del quemador. A pesar de ello, existe similitud entre el modelo base y la huella de temperatura, aunque menor al optimizado.



Figura 4.20. Comparación de distribución de temperaturas entre el modelo base, modelo optimizado y las huellas de corrosión de un quemador.

Cámara de combustión

Observando los perfiles de temperaturas de la cámara de combustión mostrados en la Figura 4.21., existe una buena correlación visual en ambos modelos con la huella de distribución. El modelo base en el lado 1 se asemeja mejor en cuanto a la huella general, mientras que el modelo optimizado coincide en las capas de huella de temperaturas. Del lado 2 el modelo base no presenta similitud, a diferencia del optimizado, que se asemeja en forma a la huella.

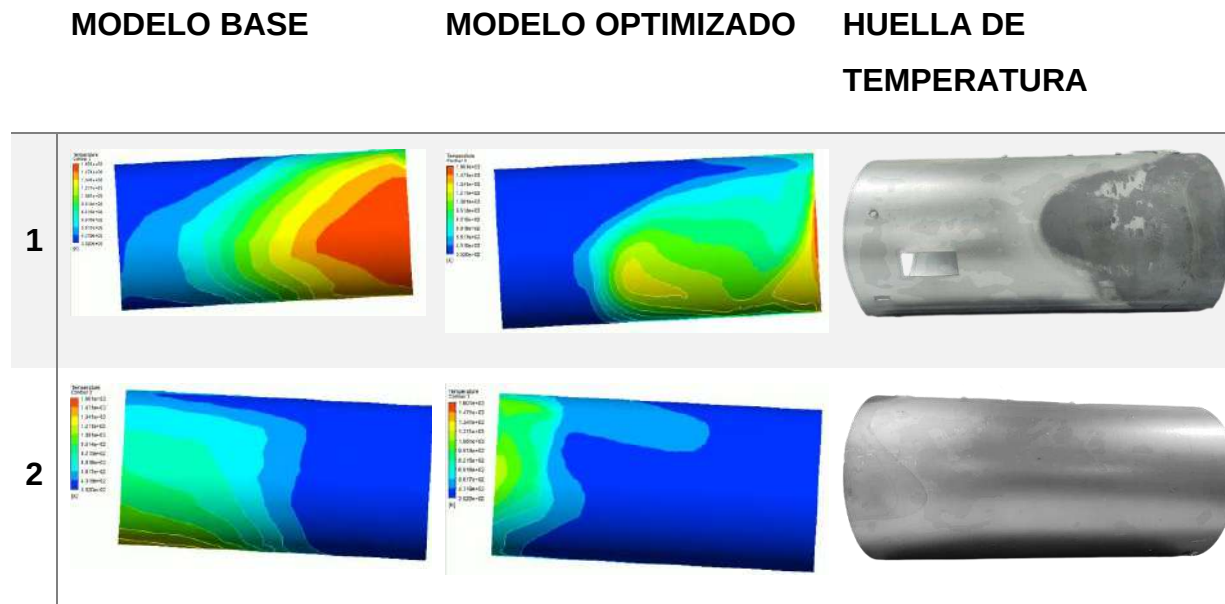


Figura 4.21. Comparación de distribución de temperaturas entre el modelo base, modelo optimizado y huellas de degradación de una cámara de combustión.

4.3.5. Difusor

A continuación, se muestra una comparación de temperaturas en el modelo línea base con el modelo optimizado, de los gases que tienen contacto en el difusor:

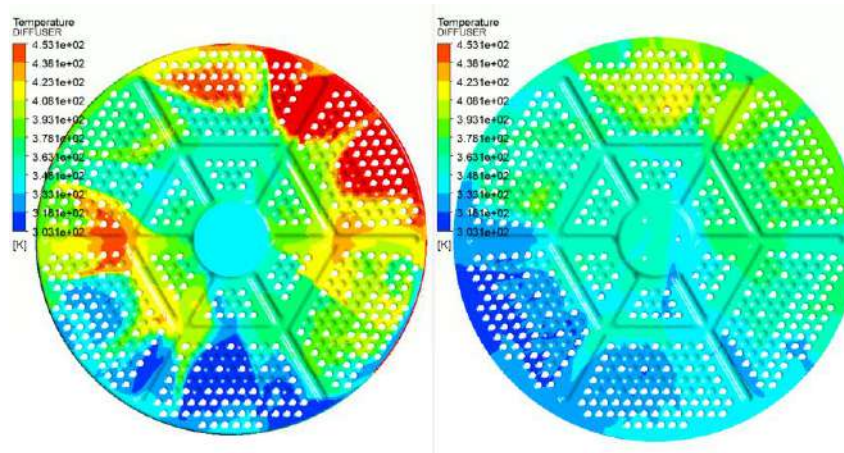


Figura 4.22. Perfil de temperaturas de modelo línea base (izquierda) y el modelo optimizado (derecha)

Como se puede notar, en el modelo optimizado se muestra una temperatura menor con una distribución más uniforme, caso contrario al modelo simplificado presentando una concentración de calor cargado a la parte superior izquierda. La temperatura y distribución de ambos casos se muestran a continuación

Tabla 4.2. Temperatura promedio y distribución en el difusor

MODELO	TEMPERATURA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
SIMPLIFICADO	388 [K]	49 [K]
OPTIMIZADO	352.6 [K]	24.6 [K]
EXPERIMENTACIÓN	434.6 [K]	6.9 [K]

Comparando ambos con las temperaturas medidas experimentalmente (que se explica a detalle a continuación), el modelo optimizado presenta una temperatura promedio menor pero una distribución de temperaturas más cercana a la realidad.

4.4. Mediciones experimentales

Los resultados de las mediciones experimentales respecto a temperatura a la entrada de la cámara de secado y emisiones en el ducto de transición se muestran a continuación:

4.4.1. Mediciones de temperatura

Acorde a la Figura 4.23., aproximadamente tras 10 minutos de operación, se llega a estado estable. El periodo de tiempo para calcular temperatura promedio se consideró del minuto 20 al minuto 40.

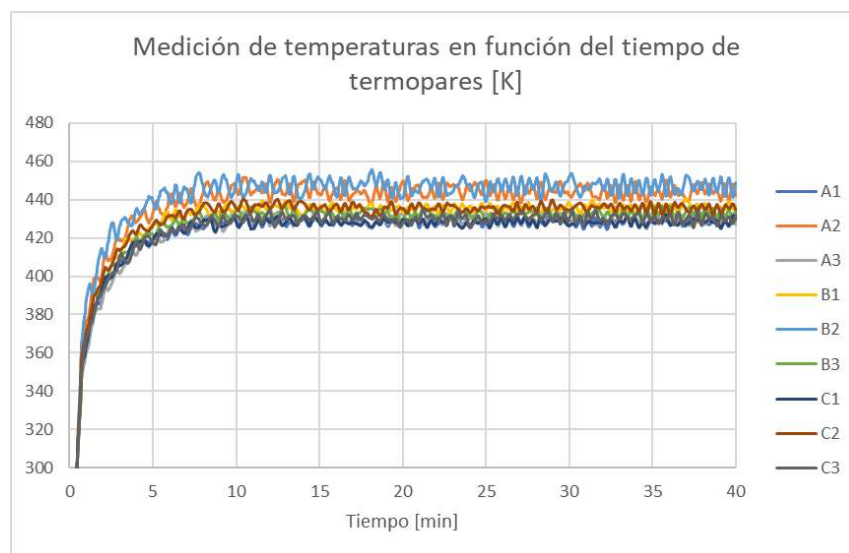


Figura 4.23. Temperaturas de los termopares en función del tiempo

En la Figura 4.24. se muestra la temperatura promedio de cada termopar. Se puede apreciar que las mayores temperaturas se encuentran en el nivel 2, esto puede explicarse por la distribución de gases calientes

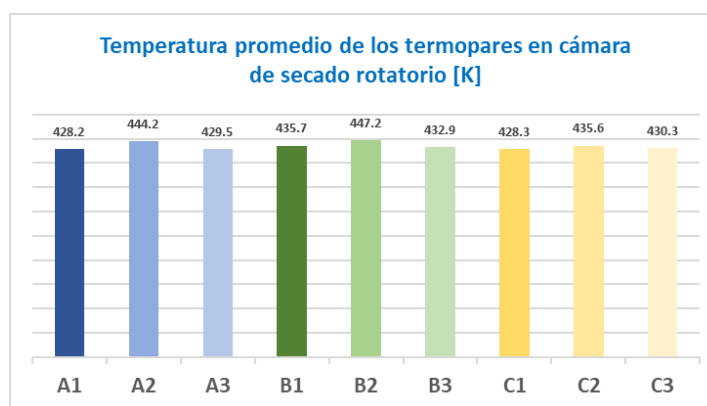


Figura 4.24. Temperaturas promedio de los termopares.

Se puede notar que el difusor de la secadora en estado estable se mantiene en un rango de temperatura de 428K a 447K, teniendo una temperatura promedio de 434.6K.

4.4.2. Medición de emisiones

La gráfica de emisiones de dióxido de carbono se muestra en la Figura 4.25., mientras que la de monóxido de carbono se muestra en la Figura 4.26.

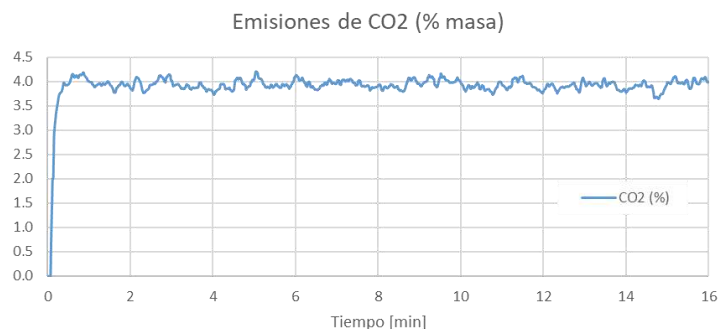


Figura 4.25. gráfica de fracción de masa en dióxido de carbono

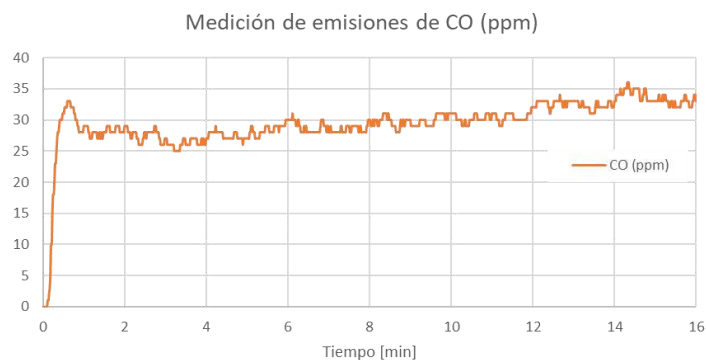


Figura 4.26. Gráfica de emisiones de monóxido de carbono

4.5. Correlación del modelo optimizado de simulación

4.5.1. Correlación de temperaturas

La comparación de temperaturas numéricas y experimentales se muestran en la Figura 4.27.

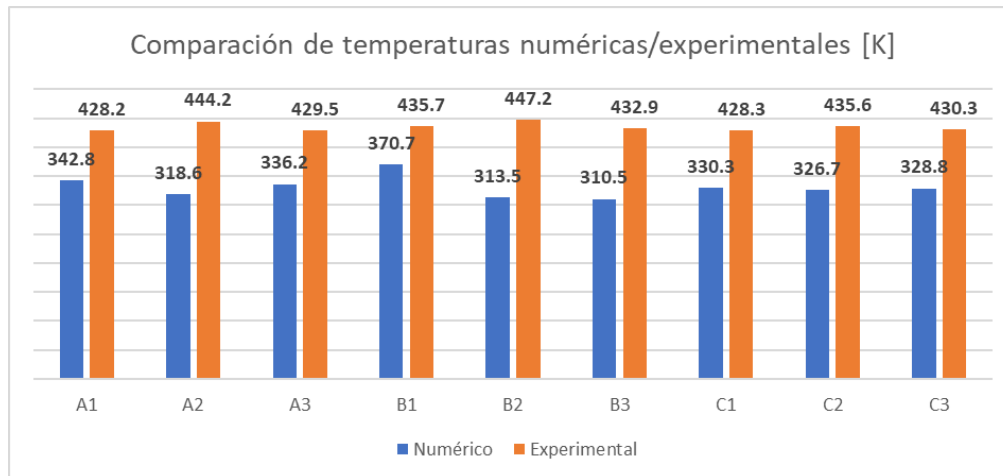


Figura 4.27: comparación de temperaturas numéricas y experimentales

Al contrastar las mediciones experimentales con numéricas se muestra una diferencia en promedio de 103.7 °C.

4.5.2. Correlación de emisiones

Las gráficas de correlación de emisiones en porcentaje de masa del dióxido de carbono y monóxido de carbono se muestran en la Figura 4.28.

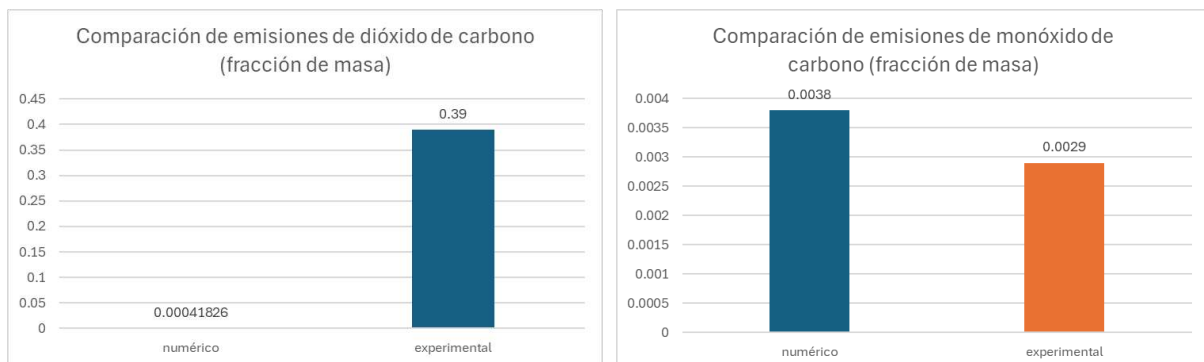


Figura 4.28. Correlación emisiones CO₂ y CO

Como se puede notar en la figura anterior, no existe correlación respecto al dióxido de carbono, caso contrario al monóxido de carbono, que muestra una correlación de 68.9%. Aunque la correlación no se encuentre en un porcentaje adecuado, se muestra que ambas cantidades se encuentran en el mismo orden de magnitud.

CONCLUSIONES

Se encuentran áreas de oportunidad en la secadora de ropa en el ducto de transición actual. En el diseño de experimentos numérico se presentó flama alargada en casi todos los casos. Demostrando que el ducto de transición tiene un impacto importante en el desempeño de la secadora. Una posible explicación de presentar flamas largas en dichas combinaciones es debido a la cantidad de aperturas que tiene el componente. Estas entradas de aire alargan la llama al haber moléculas de gas metano que no han reaccionado, encontrando oxígeno en el ducto de transición. Dicha entrada de aire fresco les quita calor a los gases de combustión, disminuyendo la temperatura.

El ducto de transición con el deflector de flama presentó una mejora en 6 de los casos. Además, que ningún caso mostró flamas largas. Las infiltraciones de aire en la base son pocas. No obstante, al tener el deflector de flama hecho con la misma lámina difusora, se genera una nueva entrada de aire fresco, disminuyendo la temperatura del gas.

El ducto de transición sin deflector de flama tiende a presentar mayor temperatura que las combinaciones con los ductos de transición anteriores. Sin embargo, 4 de las 9 combinaciones presentaron flamas largas, lo que puede significar que, junto a sus respectivas combinaciones de quemador y cámara de combustión, puede no entrar suficiente oxígeno y se alargue la llama.

Respecto a la cámara de combustión, el arremolinador no presenta mejoras en la combustión. La cámara cónica presenta un incremento respecto a la cámara de combustión actual, aunque ese incremento en el desempeño no justifica la inversión que conllevaría de cambiar de la cámara actual a la cónica.

Comparando experimentalmente la mejor combinación con la línea base, se reporta un incremento de temperaturas de 24°C en la entrada de la cámara de secado utilizando la misma cantidad de combustible. La combinación ganadora presenta ventajas no solo en desempeño, si no en manufactura, ya que no se considera la lámina difusora o el deflector de flama en las operaciones de ensamble. En caso de

que en alguna evaluación futura se requiera añadir un deflector de flama para redireccionar el calor hacia los termistores ubicados en lateral del difusor de gas, desde un punto de vista de desempeño se recomienda añadirlo como una lámina aparte, esto para minimizar infiltraciones de aire que disminuyan la temperatura de los gases a la entrada de la cámara de secado.

Se demostró que el quemador unificado tiene un mejor funcionamiento que el quemador actual. Esto debido al cambio del diámetro del Venturi a uno más reducido, además del cambio de área de salida de la porta.

Respecto al modelo de simulación avanzado, en cuestión numérica no se encontró una buena correlación, esto puede deberse a varios factores, como lo son: complejidad de modelo de reacción química monóxido de carbono-dióxido de carbono o ausencia de modelo de radiación en la simulación. Sin embargo, el modelo de simulación se considera útil como herramienta de toma de decisiones. Se demostró que utilizando la simulación CFD se pueden hallar tendencias para determinar si una propuesta es mejor o peor que la línea base.

Para trabajos futuros se buscará disminuir el consumo de combustible con la combinación de los mejores conceptos e igualar la temperatura de operación de línea base, esperando así un mejor factor de energía y validar la hipótesis propuesta.

Para el modelo de simulación, se buscará mejorar la correlación del modelo de simulación contra el desempeño de la secadora, tanto en temperaturas, como en fracciones de masa de los productos de combustión. Teniendo una mejor correlación en la secadora. Una vez resuelto esto, se añadirán modelos de generación de óxidos de nitrógeno y hollín. El refinar el modelo de simulación ayudará a dar un paso adelante a estandarizar procedimientos de prueba de ingeniería virtuales, esperando reducir tiempos en experimentación, prototipado y validación de ideas.

REFERENCIAS

- [1] PROFECO, "www.gob.mx," Mayo 2008. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/119128/Estudio_secadoras_de_ropa.pdf. [Accessed 2022 Septiembre 19].
- [2] J. F. Parr, *Fundamentals of gas combustion*, Arlington: American Gas Association, 1973.
- [3] M. Zapatero, *Análisis de velocidad de la mezcla a través de un quemador de flama parcialmente premezclada: modelación, validación y simulación*, Celaya: Instituto tecnológico de Celaya, 2018.
- [4] Energy star, "energystar.gov," 19 Mayo 2014. [Online]. Available: https://www.energystar.gov/products/appliances/clothes_dryers/key_product_criteria. [Accessed 10 Octubre 2022].
- [5] ANSI, *ANSI Z21.5.1-2016 - CSA 7.1-2016, Gas clothes dryers, volume I, type 1 clothes dryers*, 2016.
- [6] Departamento de energía de los Estados Unidos, *Energy Conservation Standards for Clothes Dryers*, Oficina de información y asuntos regulatorios de los Estados Unidos, 2022.
- [7] A. Andreini, B. Cerutti, B. Facchini and A. Innocenti, *CFD analysis of NOx emissions of a natural gas lean premixed burner for heavy duty gas turbine*, Florencia: Elsevier, 2014.
- [8] M. Pichler, F. Wesenauer, C. Jordan, S. Puskas and B. Streibl, *Design and simulation of gas burner ejectors*, Viena: Elsevier, 2021.

- [9] A. Namkhat and S. Jughai, *Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: Model and experiments*, Thailand: Elsevier, 2010.
- [10] N. Boukhalfa, *Chemical Kinetic Modeling of Methane Combustion*, Algeria: Elsevier, 2016.
- [11] J. Agudelo and W. Salinas, *Estudio teórico-experimental de quemadores de premezcla con aire inductor, para su aplicación a la pequeña y mediana industria en colombia*, Bucamaranga, 2010.
- [12] J. Thompson, S. Walton, O. Hassan, S. Rolland and J. Sienz, *The use of CFD and multi-objective optimisation techniques to customise an industrial pre-mixer*, Springer, 2017.
- [13] A. Ream, *A REDUCED-ORDER METHANE-AIR COMBUSTION MECHANISM THAT SATISFIES THE DIFFERENTIAL ENTROPY INEQUALITY*, Semantic Scholar, 2018.
- [14] Y. Cengel, *Termodinámica*, Reno: Mc Graw Hill, 2012.
- [15] ENERDATA, "datos.enerdata.net," 2022. [Online]. Available: <https://datos.enerdata.net/gas-natural/produccion-gas-natural-mundial.html>.
- [16] Dirección general de gas natural y petroquímicos, "gob.mx," [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/12459/Documento_Gas_Natural_2015.pdf. [Accessed 15 Agosto 2022].
- [17] Wikipedia, "Wikipedia," 2023 Agosto 24. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Punto_de_ignici%C3%B3n.
- [18] E. Uribe, B. Herrera and I. Bedoya, *Estudio teórico, numérico y experimental de la intercambiabilidad del gas natural en Antioquia*.

- [19] S. K. Vallabhuni, A. D. Lele, V. Patel, A. Lucassen and K. Moshhammer, *Autoignition studies of Liquefied Natural Gas (LNG) in a shock tube and a rapid compression machine*, ELSEVIER, 2018.
- [20] The engineering toolbox, *Fuel gases - Flame temperatures*, 2008.
- [21] K. Kuo, *Principles of combustion*, Hoboken: John Wiley & sons inc, 2005.
- [22] Dpto. de ingeniería energética y fluidomecánica de la Universidad de Valladolid, *Quemadores para gases*, Valladolid: Universidad de Valladolid.
- [23] M. Abían and M. U. Alzueta, *Minimización de emisiones de NOx y hollín en procesos de combustión*, Zaragoza: Instituto de investigación en ingeniería de Aragon, 2014.
- [24] S. Turns, *An introduction to combustion*, Pennsylvania: McGraw-Hill, 2000.
- [25] S. Gersen, *DEMONSTRATION OF HIGH PERFORMANCE (LOW NO_x) DOMESTIC HYDROGEN BOILERS.*, 2020.
- [26] B. Flanigan, *AN EXPLORATION IN ATMOSPHERIC GAS BURNERS*.
- [27] Weekand, *What Causes the Burner Flame on a Gas Stove to Be Yellow?*, 2023.
- [28] I. Chavez, *Curso: Sistemas de combustión*, 2011.
- [29] T. Poinso and D. Veynante, *Theoretical and numerical combustion*, Philadelphia: Edwards, 2001.
- [30] ANSYS, *Ansys CFX solver theory guide*.
- [31] L. Mendoza and L. Vera, *Estudio de diferentes modelos de turbulencia para obtener las curvas características de un perfil NACA 2415 mediante la simulación*

tridimensional de flujo de fluidos, Pamplona: Revista Bistua Facultad de Ciencias Basicas, 2019.

- [32] ANSYS, *Lecture 2: Eddy Dissipation and Finite Rate Chemistry Combustion Model*, Ansys, inc, 2015.
- [33] H. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method*, Inglaterra: Pearson education, 2007.
- [34] R. Gómez and S. Barrera, *Seis sigma: un enfoque teórico y aplicado en el ámbito empresarial basándose en información científica*, Medellín: Unilasallista, 2011.
- [35] H. Gutierrez and R. Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, Guadalajara: Mc Graw-Hill, 2007.
- [36] CFD online, "CFD online," 3 Enero 2012. [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Wiki/Meshing>.
- [37] ANSYS, *Ansys CFX-Pre User's Guide*, Canonsburg, 2021.
- [38] gasbutano.org, "gasbutano.org," 26 Agosto 2008. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20111123100511/http://www.gasbutano.org/2008/08/20/gas-butano-caracteristicas-aplicaciones-y-riesgos/>. [Accessed 15 Agosto 2022].
- [39] preciogas, "preciogas.com," 07 Julio 2022. [Online]. Available: <https://preciogas.com/instalaciones/glp/propano#:~:text=El%20propano%20es%20un%20gas,cocina%20y%20agua%20caliente%20sanitaria..> [Accessed 15 Agosto 2022].

- [40] A. Ruz, "repositorio.uchile.cl," Octubre 2008. [Online]. Available: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103287/ruz_a.pdf?sequence=3. [Accessed 15 Agosto 2022].
- [41] "old.amu.ac.in," [Online]. Available: <https://old.amu.ac.in/emp/studym/99991505.pdf>. [Accessed 19 Septiembre 2022].
- [42] W. Berry, *Design of atmosferic gas burners*, Washington D.C.: Departament of commerce: Technologic Papers of the Bureau of Standards , 1921.
- [43] J. Smith, *Ingeniería de la cinética química*, McGraw-Hill, 1986.
- [44] C. Mahandari, "Flame Lift-up on A Bunsen Burner ; A Preliminary Study," *Semantic Scholar*, 2010.

ANEXO A: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

NTI - SISTEMA DE GAS		2023																																													
		JAN					FEB					MAR					ABR					MAY					JUN					JUL					AUG										
CONOCIMIENTO DEL SISTEMA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35											
CAPACITACIÓN SISTEMA DE GAS		P																																													
DOE GAS SIMULACIÓN Y ANÁLISIS		R																																													
DURACIÓN ETAPA		C																																													
PRUEBAS EXPERIMENTALES		R																																													
SOLICITUD DE UNIDADES (GTD60/70 - LINEA BASE)		C																																													
PREPARACIÓN DE UNIDADES CON PROTOTIPOS FUNCIONALES		R																																													
VISUALIZACIÓN DE FLAMA CONDICIONES NORMALES (PERFORMANCE)		P																																													
DEFINICIÓN PUNTOS ESTRATEGICOS Y FORMA DE MEDICIÓN		R																																													
VISUALIZACIÓN DE FLAMA CONDICIONES ANORMALES (BLACK PAINT / ANSI Z21.5)		P																																													
ETAPA DE MEJORAS DE DISEÑO		R																																													
SOLICITUD DE TALLER DE MODELOS QUEMADOR MP		P																																													
OBTENCIÓN DE LÁMINA PARA QUEMADOR MP		R																																													
ENSAMBLE QUEMADOR		P																																													
PRUEBAS EXPERIMENTALES CON NUEVO QUEMADOR		R																																													
SIMULACIÓN		C																																													
PREPARACIÓN GEOMETRÍA/MALLADO		P																																													
DOE GAS SIMULACIÓN Y ANÁLISIS (J.S, V,M)		R																																													
ANÁLISIS RESULTADOS DOE		P																																													
ANÁLISIS INDEPENDENCIA DE MALLA		R																																													
SET UP SIMULACIÓN COMPLETA		P																																													
TUTORIAL SIMULACIÓN		R																																													
DOCUMENTACIÓN/ENTREGA DE MODELO COMPLETO		P																																													
DOE GAS ANÁLISIS		R																																													
SELECCIÓN MEJOR COMBINACIÓN		P																																													
REDISEÑO Y OPTIMIZACIÓN		R																																													
VALIDACIÓN SISTEMA		P																																													
DOCUMENTACIÓN		R																																													
METODOLOGÍA DISRUPTIVA PARA QUEMADOR		C																																													
VALIDACIÓN/PROTOTIPADO		R																																													
PROTOTIPADO/ITERACIONES		P																																													
ITERACIONES/REFINAMIENTO		R																																													
DOCUMENTACIÓN		P																																													
MANUFACTURABILIDAD QUEMADOR		R																																													
Revisión de costos de inversión de herramienta y costo de la parte		P																																													
Análisis de formabilidad del quemador		R																																													

ANEXO B: ANALISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE SISTEMA DE GAS

Subassembly	Item	Function & FIDO block	Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure Mode on End Product and Safety	Srv	Maximum severity	Potential Cause Mechanism	Ocu	Design Characteristics (prevention)	Failure Detection (early)	Failure	Subseq	RPN	Recom. actions
Gas system	burner	provide flame	misaligning burner	1. burner does not ignite 2. cycle times	6	6	1. bad screws	3	TOLERANCE 1. LOP	3. AHSZ21.5	7	18	126	27. evaluate the flame behavior
			no option	1. burner does not ignite 2. cycle times	6	6	1. burner out of position	3	TOLERANCE 1. LOP	3. AHSZ21.5	1	18	18	27. evaluate the flame behavior
	igniter	ignite the gas	2. unburned gas	1. burner does not ignite 2. gas odor	6	8	1. incorrect gap 1. igniter burner	5	26. design	22. deformation weld 23. mispiping weld	4	40	160	4. CAUSALITY 40. Misalignment of electrical leads
			4. abnormal spark	1. burner does not ignite 2. cycle times	6	6	1. incorrect gap 1. broken igniter and burner	3	define a max. wiring gap	18. ALPI	9	18	162	22. define a max. wiring gap for voltage
														verify correct wiring before igniter is connected on bracket
														evaluate ANSI Z21.5 and check the flame behavior
	combustion chamber	flame & heat production	1. leakage	1. burner does not ignite 2. long drying cycle times 3. wet clothes	6	6	1. wrong combustion chamber area and design	3	1. correct combustion chamber capacity (c-uf)	2. AHSZ21.5 10. BLACK-PANIT	7	18	126	27. evaluate ANSI Z21.5 and check the flame behavior
	transition duct		1. heat burns	1. burner does not ignite 2. cycle times	6	6	1. bad design 1. burner	6	TOLERANCE 1. LOP	8. Visual inspection 9. WMT 20. PCE 22. FIELD TEST	3	36	108	4. CAUSALITY 32. component not connected
	flame deflector	conductive air to the gas diffuser	1. heat burns	1. burner does not ignite 2. cycle times	6	6	1. bad design 1. burner	6	TOLERANCE 1. LOP	8. Visual inspection 9. WMT 20. PCE 22. FIELD TEST	3	60	180	4. CAUSALITY 32. component not connected

ANEXO C: RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

# CORRIDA	QUEMADOR	CÁMARA DE COMBUSTIÓN	DUCTO DE TRANSICIÓN	TEMP FLAMA	TEMP MAX DRUM	TEMP MIN DRUM	TEMP AVE DRUM	DESV STD DRUM INLET	FLAMA	RANGO
1				1876	513	311	388	49	largo	202
2				1894	572	343	451	53	largo	228
3				1930	588	342	435	59	corto	246
4				1869	505	297	375	53	largo	208
5				1945	602	353	451	53	largo	249
6				1987	572	339	437	53	corto	233
7				1918	518	299	382	57	largo	219
8				1861	580	349	452	58	corto	231
9				1896	558	347	432	50	corto	211
10				1894	471	298	368	44	corto	173
11				1925	581	324	425	51	corto	258
12				1960	566	339	424	56	corto	226
13				2003	519	298	377	52	largo	221
14				1917	565	338	429	50	corto	227
15				1960	591	355	427	47	corto	236
16				1851	516	312	384	53	largo	204
17				2010	599	337	418	59	corto	261
18				2010	599	325	430	78	corto	274
19				1861	411	299	343	27	corto	112
20				1971	602	324	430	63	corto	278
21				1952	509	327	393	37	corto	182
22				1885	499	299	367	51	largo	200
23				1876	621	355	443	64	largo	266
24				1998	516	330	399	42	corto	186
25				1885	513	298	371	54	largo	215
26				1831	685	340	452	77	largo	345
27				1856	586	334	438	68	corto	253