



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA – INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y SIMULACIÓN CFD ENTRE UN QUEMADOR  
DE GAS PROPANO Y UNA PERILLA DE POLICARBONATO.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
CLAUDIO CRUZ MARQUEZ.

TUTOR  
DR. MARCELO LOPEZ PARRA  
DR. DAFNE GAVIRIA ARCILA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

Unidad de Alta Tecnología  
UNAM - Campus Juriquilla, Querétaro, QRO.  
Diciembre de 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich**

**SECRETARIO: Dr. Jesus Manuel Dorador González**

**VOCAL: Dr. Marcelo López Parra**

**1<sup>er</sup> SUPLENTE: Dr. Jorge Alfredo Ferrer Pérez**

**2<sup>do</sup> SUPLENTE: Dr. Dafne Gaviria Arcila**

**LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:**

Unidad de Alta Tecnología – Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla  
Fray Antonio de Monroy e Híjar 260, Villas del Mesón, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

**TUTOR DE TESIS:**

**DR. MARCELO LOPEZ PARRA.**

---

FIRMA

# Agradecimientos

---

Agradezco profundamente la oportunidad que se me ha otorgado para poder seguir educándome y desarrollando mis habilidades en la Ingeniería, y poder contribuir en uno de los caminos más complicados; la investigación, la cual busca genuinamente contribuir al desarrollo del bien común, al desarrollo de conocimientos, y a la solución de problemas.

A mi Familia:

Agradezco con el corazón a mi madre Sara Marquez quien me ha dado todo en la vida a base de mucho sacrificio y esfuerzo.

Agradezco a mi padre Roberto Cruz quien me ha enseñado los libros más influyentes en mi vida.

Agradezco a mi hermano Jose Miguel, quien fue mi compañero de aventuras y con quien pase los días más divertidos y emocionantes en la niñez.

Agradezco con el alma a Dalila Rangel quien me ha mostrado continuamente su amor, dedicación, devoción y su apoyo durante el desarrollo de esta investigación y a quien tanto he querido.

A mis colegas.

Agradezco humildemente a mi colega Victor Laureano, quien fue mi compañero de estudio en paralelo, desarrollando su propia tesis y a quien reconozco como equipo, porque sin él, esto no hubiera sido posible.

Agradezco humildemente a mi buen amigo Asael Terrazas que con su actitud de optimismo siempre me ayudado a salir con nuevas ideas y quien siempre me dio un mundo de soluciones a mis problemas.

Agradezco humildemente a mi colega Rafael Martin del campo quien me dio apoyo, guía y una grandiosa amistad.

Agradezco humildemente al ingeniero Octavio Lugo quien fue el que me ha dado esta gran oportunidad de poder seguir educándome, y a quien reconozco como un excelente líder y un gran amigo.

Un Agradecimiento especial.

Agradezco y reconozco con mucho entusiasmo y sobre todo como un talentoso investigador, al Doctor Ernesto Arias del campo, quien me ha asesorado en los temas más complicados de esta investigación.

Agradezco especialmente a la Doctora Dafne Gaviria Arcila, quien me ha dejado impactado con sus conocimientos y pone en alto la capacidad intelectual que tienen las mujeres.

Agradezco especialmente al Doctor Marcelo Lopez Parra quien ha sido mi asesor titular de tesis y quien me ha ayudado a darle estructura a esta investigación.

Por último, agradezco a dios por irme guiando en mi vida, agradezco profundamente y con el más sincero respeto por hacerme fuerte con las lecciones que me ha tocado llevar, con las aventuras que me ha dado, con las personas que he conocido, con las victorias y fracasos, con las alegrías y tristezas, muchas gracias.

# Contenido.

Agradecimientos.....	4
Contenido.....	5
Índice de ilustraciones.....	8
Índice de tablas.....	11
Índice de ecuaciones.....	1
Lista de abreviaturas.....	2
Lista de símbolos.....	3
Resumen.....	4
Abstract.....	5
Descargo de responsabilidad.....	6
Introducción.....	7
Planteamiento del problema.....	8
Objetivos.....	11
General.....	11
Específicos.....	11
Alcance.....	11
Antecedentes.....	11
Estado del arte.....	12
Conclusiones de estado de arte.....	17
Capítulo 1. Marco teórico.....	18
Transferencia de calor.....	18
Conducción.....	18
Ley de Fourier de conducción de calor.....	19
Difusividad térmica.....	19
Convección.....	20
Ley de enfriamiento de Newton.....	21
Radiación ley de Stefan-Boltzmann.....	21
Emisividad.....	22
Macromoléculas.....	23
Polímeros.....	23
Clasificación de los polímeros.....	23
Materiales termoplásticos.....	24
Policarbonato.....	26

Makrolon. ....	27
Aplicaciones del Makrolon. ....	27
Quemadores de gas. ....	29
Definición de reacción de combustión. ....	29
Descripción de modelos para simulación. ....	30
Modelos de turbulencia. ....	30
Modelo Laminar. ....	30
Modelo k-épsilon. ....	30
Modelos de Radiación. ....	30
Modelo de Transferencia Discreta (modo de transferencia S2S). ....	30
Modelo P1. ....	31
Capítulo 2. Metodología. ....	32
Metodología DFSS. ....	32
Metodología DMADV. ....	33
Metodología de diseño 3D TOP DOW DESING. ....	34
Metodología de simulación. ....	35
Análisis CFD. ....	35
Aplicaciones del CFD en la Ingeniería. ....	35
Metodología solucionador acoplado para simulación. ....	35
Procesamiento de metodología de simulación. ....	37
Capítulo 3. Medición. ....	38
Medición de temperatura en perillas. ....	38
Experimentación para obtención de emisividades. ....	49
Medición de radiación térmica en quemadores de gas. ....	51
Medición de capacidad térmica de un quemador a gas. ....	55
Capítulo 4. Análisis (Primer caso base de simulación). ....	55
Cálculo de Capacidad térmica de un quemador a gas. ....	56
Análisis y Procesamiento de Simulación CFD. ....	58
Generación de Modelo CAD. ....	58
Creación de la malla computacional. ....	60
Configuración de la Simulación. ....	61
Transporte de radiación. ....	62
Temperatura Total. ....	63
Transferencia Discreta en CFX. ....	63
Cálculo de la solución. ....	64

Criterios para el cálculo.....	64
Criterios de convergencia RMS.....	64
Residuales.....	65
Análisis de los resultados del primer caso base.....	67
Discusión y análisis de los resultados.....	71
Capítulo 5. Simulación numérica de combustión de un quemador de gas.....	73
Estudio y explicación de fenómeno de combustión en un quemador a gas.....	73
Cálculo de flujo masico y velocidad en el orificio del inyector de gas.....	74
Simulación numérica computacional del fenómeno de mezclado para un quemador a gas.....	76
Resultados de simulación numérica computacional del fenómeno de mezclado para un quemador a gas.....	77
Resultados de simulación numérica computacional del fenómeno de combustión para un quemador a gas.....	78
Capítulo 6. Simulación de transferencia de calor entre un quemador a gas y una perilla de material plástico.....	81
Procesamiento de simulación ensamble CAD y Limpieza de modelo CAD.....	81
Mallado de ensamble para simulación de transferencia de calor.....	82
Condiciones de frontera para simulación de transferencia de calor.....	82
Resultados de simulación de transferencia de calor entre un quemador a gas y una perilla.....	83
Conclusiones.....	86
Trabajo a futuro.....	87
Anexo.....	88
Independencia de malla.....	90
Referencias.....	95
Bibliografía.....	95

## Índice de ilustraciones.

---

Ilustración 1. Experimento Mabe transferencia de calor.....	8
Ilustración 2. Capacidades térmicas de quemadores .....	9
Ilustración 3.Reporte de falla Mabe .....	10
Ilustración 4. Validación de modelo de simulación numérica .....	12
Ilustración 5. Correlación entre distancia de cristales y transferencia térmica .....	13
Ilustración 6.Esquema de Estufa Lorena .....	14
Ilustración 7.Resultados de campo.....	14
Ilustración 8. Balance de energía en estado estacionario con contribuciones de transferencia de calor .....	15
Ilustración 9.Mapa de Isotermas. Imagen termográfica.....	16
Ilustración 10.Mapeo de temperaturas superficiales. Representación de circulación de humos. ....	16
Ilustración 11.Medición de la conductividad térmica. Fuente. ....	18
Ilustración 12.Ejemplo de la convección natural .....	20
Ilustración 13.Materiales amorfos y cristalinos.....	25
Ilustración 14.Materiales amorfos y cristalinos.....	25
Ilustración 15.Quemador domestico de gas.....	29
Ilustración 16.Metodología DEMADV .....	33
Ilustración 17.Diseño CAD con metodología TDD. ....	34
Ilustración 18.Proceso de cálculo del solver acoplado.....	36
Ilustración 19. Parrilla de empotrar IO Mabe.....	38
Ilustración 20.Parrilla de empotrar IO Mabe, e identificación de perillas. ....	39
Ilustración 21.Hydra Series III.....	39
Ilustración 22.Identificación de termopar en perilla. ....	39
Ilustración 23. Gráfico temperaturas en perilla 1.QDI.TR.....	40
Ilustración 24. Gráfico temperaturas en perilla 6.QDD estándar. ....	41
Ilustración 25.Gráfico temperaturas en perilla 2.QTI estándar. ....	42
Ilustración 26. Gráfico temperaturas Máximas en perillas. ....	43
Ilustración 27.Temperaturas ambientes entre perillas.....	43
Ilustración 28.Temperaturas máximas ambientes entre perillas.....	44
Ilustración 29.Gráfico de temperaturas, QTR encendido y los demás quemadores apagados.....	45
Ilustración 30. Gráfico de temperaturas, QTR encendido y los demás quemadores apagados.....	46
Ilustración 31. Gráfico de temperaturas, QTR encendido y los demás quemadores apagados.....	47
Ilustración 32. Gráfico de temperaturas, QTR encendido y los demás quemadores apagados. (termopares ambientes).....	48
Ilustración 33.Cámara FLIR T640.....	49
Ilustración 34.Termografía- Emisividad de Perilla. ....	50
Ilustración 35.Sensor de radiación y convección RADCON. ....	51
Ilustración 36.Imagen ilustrativa ensayo de radiación y convección térmicas en quemadores a gas. ....	52
Ilustración 37. Gráfico- radiación y convección Quemador Triple Ring y comal. ....	52
Ilustración 38. Gráfico radiación y convección quemador estándar y comal. ....	54
Ilustración 39.Medición de radiación quemador estándar, comal y perilla a distancia nominal.....	54
Ilustración 40. Reducción de geometría de comal. ....	58
Ilustración 41.Reducción de geometría de ensamble perilla 3 piezas. ....	58
Ilustración 42.Reducción de geometría en parrilla de fundición. ....	59
Ilustración 43.Reducción de geometría de cubierta. ....	59
Ilustración 44.Reducción de geometría de tapas de quemador. ....	59
Ilustración 45.Reducción de geometría de quemador. ....	59
Ilustración 46.Reducción de ensamble principal. ....	60
Ilustración 47.Dominio del sistema. ....	60

Ilustración 48. Generación Booleano de ensamble.....	60
Ilustración 49. Malla computacional del ensamble.....	61
Ilustración 50. Configuración de la simulación.....	61
Ilustración 51. Recursos computacionales.....	64
Ilustración 52. Configuración de corrida.....	64
Ilustración 53. Convergencia de experimentación.....	65
Ilustración 54. Convergencia para transferencia de calor.....	66
Ilustración 55. Convergencia para ecuaciones de turbulencia.....	66
Ilustración 56. Tiempo de simulación.....	67
Ilustración 57. Resultados de simulación.....	67
Ilustración 58. Comparación de resultados de simulación y los experimentales.....	68
Ilustración 59. Contorno de temperatura en difusor de perilla.....	69
Ilustración 60. Comparación de resultados en difusor de perilla.....	70
Ilustración 61. Vectores de velocidades del fluido.....	70
Ilustración 62. Comparación de resultados de simulación y los experimentales. (hipótesis).....	71
Ilustración 63. Comparación de resultados en difusor de perilla. (hipótesis).....	72
Ilustración 64. imagen ilustrativa de proceso de combustión de un quemador a gas.....	74
Ilustración 65. Diámetro nominal de inyector de gas.....	75
Ilustración 66. Imagen representativa de mallado de quemador mediano.....	76
Ilustración 67. Imagen representativa de mallado e interfaz de quemador mediano.....	76
Ilustración 68. Condición de frontera del inyector de gas.....	77
Ilustración 69. Vectores de velocidad para el dominio del quemador.....	77
Ilustración 70. Fracción de masa en quemador.....	77
Ilustración 71. Fracción de masa en quemador, con vista de malla.....	77
Ilustración 72. Velocidad de salida en portas de quemador.....	78
Ilustración 73. Fracción de masa en portas de quemador.....	78
Ilustración 74. Imagen de condición de frontera, Quemador-Combustión.....	78
Ilustración 75. Temperatura de flama en quemador.....	79
Ilustración 76. Combustión en quemador.....	79
Ilustración 77. vectores de velocidad en combustión.....	79
Ilustración 78. Temperatura de combustión.....	79
Ilustración 79. Vectores de velocidad y mallado.....	79
Ilustración 80. Espectro de flama representado por temperatura.....	80
Ilustración 81. Forma de flama representada.....	80
Ilustración 82. Limpieza de modelo CAD.....	81
Ilustración 83. Modelo CAD de ensamble de parrilla.....	81
Ilustración 84. Mallado de ensamble para simulación numérica.....	82
Ilustración 85. Condiciones de frontera del ensamble.....	82
Ilustración 86. Cuevas residuales de masa, momento y fracción de masa de CH <sub>4</sub> .....	83
Ilustración 87. Fracción de masa en quemador.....	83
Ilustración 88. Fracción de masa en quemador.....	83
Ilustración 89. Fenómeno de combustión en ensamble global.....	84
Ilustración 90. Distribución de temperaturas en perilla.....	85
Ilustración 91. Distribución de temperaturas en la perilla.....	85
Ilustración 92. Distribución de temperaturas en las perillas.....	85
Ilustración 93. Gráfico temperaturas en perilla 3. QTC. Estándar.....	88
Ilustración 94. Gráfico temperaturas en perillas 4. QDC. Estándar.....	89
Ilustración 95. Gráfico temperaturas en perilla 5. QTD. Estándar.....	89
Ilustración 96. Independencia de Malla.....	90
Ilustración 97. Malla aumentada por factor de 1.1.....	91
Ilustración 98. Temperatura máxima en perilla con aumento de tamaño de malla factor 1.1.....	91

Ilustración 99. Temperatura máxima en perilla con reducción de tamaño de malla factor 1.1.....	92
Ilustración 100. Temperatura máxima en perilla con reducción de tamaño de malla factor 1.1.....	92
Ilustración 101. Tabla de refinamiento de Malla.....	93
Ilustración 102. Grafica comparativa entre el número de elementos y temperatura de perilla.....	93
Ilustración 103. Prueba estadística T-Student. ....	94

## Índice de tablas

---

Tabla 1. Temperaturas en las perillas.....	9
Tabla 2. Presiones de prueba.....	55
Tabla 3. Tabla de actividades.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Índice de ecuaciones.

---

Ecuación 1. Razón de transferencia de calor H. ....	19
Ecuación 3. Difusividad Térmica.....	19
Ecuación 4. Convección de calor.....	21
Ecuación 5. Razón de Radiación.....	22
Ecuación 6. Ecuación Stefan-Boltzmann.....	22
Ecuación 7. Forma General de una reacción química.....	29
Ecuación 8. Radiación de calor por unidad de área.....	53
Ecuación 9. Flujo total de calor.....	53
Ecuación 10. Capacidad térmica de un Quemador a Gas.....	56
Ecuación 11. Flujo volumétrico de gas.....	56
Ecuación 12. Densidad de Gas húmedo.....	57
Ecuación 13. Presión de vapor de agua.....	57
Ecuación 14. Ecuación de transporte radiativa.....	62
Ecuación 15. Simplificación de ecuación RTE.....	63
Ecuación 16. RTE sistema homogéneo.....	63
Ecuación 17. Intensidad $I_v$ .....	63
Ecuación 18. Capacidad térmica de quemador en kW.....	74
Ecuación 19. Volumen de gas.....	75
Ecuación 20. Flujo masico de gas.....	75

## Lista de abreviaturas

---

PC	Policarbonato.
UV	Rayos ultravioleta.
SS	Seis Sigma.
CTQ.	Critical to Quality.
(APAC)	Asia-Pacífico.
(EMEA / LA)	Europa, Medio Este, África y América Latina.
(NAFTA)	Norteamérica y México.
Q.TR	Quemador Triple Ring
Q.EST	Quemador Estándar.
T.C.	Termocupla
L.P.G.	Gas Licuado de Petróleo.
N.O.M.	Norma Oficial Mexicana.
NOX	Óxidos de nitrógeno, gases contaminantes.
DMADV	Define, Measure, Analyze, Design, Verify.
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve, Control.
IDOV	Identify, Define, Optimize, Validate.
CQDFSS	Comercial, Quality, Design For Six Sigma.
DFSS	Design For Six Sigma.
TDD	TOP DOWN DESING.

## Lista de símbolos

---

$T_g$	Temperatura de transición vítrea.
$L$	Espesor de placa.
$A$	Área, superficie.
$K$	Constante de proporcionalidad.
$Q$	Cantidad de calor.
$H$	Razón de transferencia el calor.
$\Delta T$	Diferencia de temperaturas. (delta T).
$\dot{Q}_{cond}$	Tasa de conducción de calor.
$\rho c_p$	Capacidad calorífica de un material.
$c_p$	Calor específico.
$\alpha$	Difusividad térmica.
$\dot{Q}_{conv}$	Tasa de transferencia de calor por convección.
$H$	Coefficiente de transferencia de calor por convección.
$T_s$	Temperatura de la superficie.
$T_f$	Temperatura del fluido.
$W$	Watts.
$R$	Razón de radiación.
$P$	Potencia radiante.
$\epsilon$	Emisividad.
$k$	Constante de conductividad térmica.
$t$	Tiempo.
$T$	Temperatura Absoluta.
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann tiene el valor de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}^4$ .
$\dot{Q}_{Rad}$	Tasa de transferencia de calor por Radiación.
$CT$	Capacidad térmica nominal.
$V_0$	Flujo volumétrico de gas seco que se pudo haber obtenido bajo las condiciones de referencia, en m <sup>3</sup> /h.
$V$	Flujo volumétrico que se obtiene y se expresa, bajo condiciones de prueba, en m <sup>3</sup> /h.
$P_a$	Presión atmosférica en kPa.
$P$	Presión de suministro de gas en kPa.
$t_g$	Temperatura de gas en el punto de medición en °C.
$d$	Densidad relativa del gas utilizado, seco o húmedo, relativo al aire seco.
$d_r$	Densidad relativa del gas de referencia seco, relativo al aire seco.
$P_w$	Presión de vapor de agua.
$e$	Numero adimensional de Euler con un valor de 2.71828183
$PC$	Poder calorífico del gas.

## Resumen

---

La presente tesis realiza un análisis de transferencia de calor entre un quemador de gas de una parrilla de empotrar (para cocinas) hacia el control de mandos, en este caso una serie de perillas de material plástico, donde la importancia de este análisis recae en la solución de una falla en “campo” donde las perillas se rompen o se facturan en el vástago de perilla.

Este análisis se hace por medio de una simulación numérica computacional ANSYS CFX, donde se estudia la transferencia de calor que emite el quemador y como este calor se distribuye en la perilla de plástico, y del vástago de la perilla.

La investigación no solo incluye un análisis computacional si no que los resultados de la simulación se comparan con las mediciones experimentales que se hacen en los laboratorios de ensayos, dichos ensayos están bajo un procedimiento bien claro y descrito obedeciendo directamente la norma NOM-010-SESH-2012.

Las primeras simulaciones se proponen solo utilizando la radiación que se obtuvo experimentalmente en los laboratorios, como entrada principal para alimentar la simulación, sin embargo, después se estudia el problema con una simulación de combustión, donde se realiza un análisis de mezcla de gas metano y aire para obtener los valores de velocidad y presiones en las portas del quemador, que describen la forma de la flama, para después hacer un estudio de combustión en el quemador y así realmente saber la cantidad de calor que este libera.

Finalmente, en el último capítulo de esta tesis, se realiza la simulación de transferencia de calor donde se obtiene la distribución de temperaturas en la perilla y en el vástago de la perilla, y donde se concluye la relación de error en entre la simulación y la experimentación, para poder finalmente concluir que se puede tener un modelo y procedimiento de predicción de temperaturas antes del diseño final del producto, e implícitamente se describe el procedimiento para poder hacer una simulación de mezclado y combustión en un quemador de gas de uso doméstico.

# Abstract

---

This thesis performs an analysis of heat transfer between a gas burner of a built-in grill (for kitchens) to the main control, in this case a series of plastic knobs, where the importance of this analysis is given in a failure a “field” where knobs are breaking or bent on the knob stem.

This analysis is done by means of an ANSYS CFX computational numerical simulation, where the heat transfer emitted by the burner is studied and how this heat is distributed in the plastic knob, and the stem of the knob.

The investigation not only includes a computational analysis, but also the results of the simulation are compared with the experimental measurements that are made in the test laboratories, these tests are under a very clear and described procedure, directly obeying the NOM-010-SESH standard. -2012.

The first simulations are proposed only using the radiation that was obtained experimentally in the laboratories, as the main input to feed the simulation, however, later the problem is studied with a combustion simulation, where an analysis of the methane and gas mixture is carried out air to obtain the speed and pressure values in the burner ports, which describe the shape of the flame, to later carry out a combustion study in the burner and thus really know the amount of heat that it releases.

Finally, in the last chapter of this thesis, the heat transfer simulation is carried out where the temperature distribution in the knob and in the knob stem is obtained, and where the error relationship between the simulation and the experimentation is concluded, in order to finally conclude that it is possible to have a temperature prediction model and procedure before the final design of the product, and implicitly describes the procedure to be able to make a simulation of mixing and combustion in a gas burner for domestic use.

## Descargo de responsabilidad

---

# Introducción

---

El estudio numérico computacional de diferentes tipos de fenómenos físicos ha sido modelado por estas nuevas herramientas computacionales, ayudando de manera visual a comprender como es el comportamiento de dichos fenómenos físicos, químicos, mecánicos, etc., por lo cual las herramientas computacionales se han vuelto de suma importancia para resolver este tipo de problemas.

En el campo de diseño mecánico industrial estas herramientas son utilizadas frecuentemente para poder ahorrar costos en tiempo y prototipado de partes mecánicas, en esta tesis el análisis numérico computacional se hará con el software ANSYS-CFX, que es un módulo de ANSYS que permite analizar fenómenos de combustión y transferencia de calor, que para esta investigación se requiere modelar.

Obtener una solución de simulación antes de poder tener un producto en etapa final de diseño se vuelve un crítico en el desarrollo de productos, ya que permite perfeccionar el diseño y robustecerlo antes de que las piezas estén en la etapa final y así a nivel sistema se obtienen mejores características del producto final.

El estudio principal de esta tesis será en el análisis de transferencia de calor de un quemador a gas de uso doméstico y una perilla de material plástico, la cual presenta una serie de fallas en campo, donde ocasiona molestias y costos a la compañía y a los usuarios finales del producto.

La metodología que se aplicara para el estudio de esta tesis engloba metodología para experimentación y pruebas de ensayos en laboratorios, metodología de modelación CAD (TDD) metodología de proyectos (SS) y metodología para la simulación de fenómenos físicos (CAE).

Las salidas de esta investigación serán de mucha utilidad ya que representan un procedimiento de como este tipo de fenómenos puede ser estudiado y como a partir de este tipo de estudios se puede empezar a robustecer el diseño de piezas mecánicas, ya que permiten la iteración de diferentes corridas con el fin de brindar tiempos y optimizaciones al diseño antes de comercializarlo.

## Planteamiento del problema

---

En octubre del 2019 se comunica al equipo de cocinado de Mabe TYP el incremento de fallas en campo en las parrillas de empotre, este aumento de fallas se presenta debido a que el producto está teniendo perillas rotas y perillas fisuradas.

La causa principal de este problema es el uso de recipientes de gran diámetro que al colocarse sobre las parrillas pueden quedar muy cerca de las perillas, lo que ocasiona un incremento de temperatura en uno de los componentes de las perillas, que es el difusor de perilla o vástago de perilla, el cual está hecho de material de policarbonato, los utensilios de cocina como son las cacerolas y comales de más de 30 cm de diámetro ocupan un espacio muy grande sobre las parrillas, por esta razón una gran área del utensilio queda arriba de la perilla, o al menos muy cerca de la perilla, lo cual genera radiación desde el quemador hacia la perilla, logrando calentar y degradar con el tiempo al difusor. Asimismo, cuando se usan diferentes agentes limpiadores atacan el policarbonato, por las propiedades químicas que tienen estos agentes limpiadores, una vez en contacto con el policarbonato ocurren reacciones químicas sobre el mismo, degradando el material hasta que, con la combinación de calor y desgaste mecánico ocasionado por uso cotidiano al girar la perilla para encender el quemador de gas, el difusor llega a la falla; difusores fisurados y rotos por desgaste mecánico (par de torsión).

Para explicar mejor el problema se expondrá cada fenómeno en los siguientes párrafos.

Para replicar las fallas encontradas en campo se someten un par de muestras, a pruebas de laboratorio, donde se pone la parrilla en uso normal de funcionamiento encendiendo cada uno de sus quemadores a máxima potencia y utilizando un comal de 38 centímetros de largo y se deja en uso de cocción por una hora, con esta condición de operación se sondean las temperaturas por medio de termopares colocados en cada una de las perillas.



Ilustración 1. Experimento Mabe transferencia de calor [1].

Las temperaturas que se obtiene tras este experimento en las zonas más calientes son de aproximadamente 125°C. El sondeo de temperaturas es de acuerdo con las siguientes imágenes donde se colocan letras de A – F para asignar identificación a las perillas, y en la tabla se muestran las temperaturas obtenidas [1].

Estas temperaturas se dan por el fenómeno de transferencia de calor, es decir; el calor que genera la combustión del quemador es transmitido por conducción, radiación y convección, de tal forma que parte de esta energía es absorbida por la perilla.

Esta imagen presenta la identificación de las perillas.



Ilustración 2. Capacidades térmicas de quemadores [1].

Se presenta tabla de temperaturas en cada perilla.

PGP96T10		Temperaturas Maximias																		Tiempo de cierre de termodisco (minutos)
		Perilla A			Perilla B			Perilla C			Perilla D			Perilla E			Perilla F			
Spec Termodisco	CONDICION	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
53°C	Comal en QDI, QDD, pots de 22 en el resto a maxima temperatura	121	125	119	100	103	103	108	120	105	122	119	112	98	97	96	104	106	102	11'40"

Tabla 1. Temperaturas en las perillas [1].

Como se puede ver en esta tabla de tres parrillas que fueron sometidas al experimento la perilla “A” alcanza hasta 125°C, lo cual indica que para el Makrolon 2407 que es la marca comercial del policarbonato y comparando esta temperatura experimental con la temperatura de transición vítrea del policarbonato  $T_g = 143$ , no está sobrepasando dicha temperatura y en teoría no estaría cambiando sus propiedades, entonces una hipótesis de porque ocurre la falla nace al pensar en que la falla en el difusor no sucede cuando el Makrolon llega a una temperatura de 125°C, si no cuando con el paso del tiempo y el uso común de la parrilla para calentar los alimentos se va presentando la degradación en el

Makrolon hasta que tiempo después y eventualmente llega a la falla cuando se abre o cierra la perilla para encender el quemador de gas [1].

Estudios de campo que se han hecho y estudios que se han validado y replicando en los laboratorios de materiales de Mabe, donde se ha demostrado que el policarbonato (Makrolon 2407) es atacado principalmente por productos de limpieza que tienen hidróxido de sodio, estos productos químicos se han identificado en el limpiador de grasa Easy Off (pasta limpiador de hornos, 238 g, amarillo /rojo) donde sus principales ingredientes son ; Agua, hidróxido de sodio, espesante y fragancia [1].

### PRUEBAS DE LABORATORIO (Reproducción de falla)

Revisando los ingredientes de los limpiadores, se identifica el Hidróxido de Sodio como el principal componente que ataca al difusor (Policarbonato Makrolon 2407)



**Easy Off**

<b>Makrolon has limited resistance to:</b>		
Anti-freeze	Hydrochloric Acid (concentrate)	Sulfuric Acid (concentrate)
Calcium Chloride	Milk of lime (CaOH)	
Cyclohexanol	Nitric Acid (concentrate)	
Ethylene Glycol		
<b>Makrolon is not resistant to:</b>		
Acetaldehyde	Caustic Potash Solution 5%	Nitrobenzene
Acetic Acid (concentrate)	Caustic Soda Solution 5%	Nitrocellulose Lacquer
Acetone	Chloroethene	Ozone
Acrylonitrile	Chlorobenzene	Phenol
Ammonia	Cutting Oils	Phosphorous Hydroxy Chloride
Ammonium Fluoride	Cyclo Hexanone	Phosphorous Trichloride
Ammonium Hydroxide	Cyclohexene	Propionic Acid
Ammonium Sulfide	Dimethyl Formamide	Sodium Sulfide
Benzene	Ethane Tetrachloride	<b>Sodium Hydroxide</b>
Benzoic Acid	Ethylamine	Sodium Nitrate
Benzyl Alcohol	Ethyl Ether	Tetrahydronaphthalene
Brake Fluid	Ethylene Chlorohydrin	Thiophene
Bromobenzene	Formic Acid (concentrate)	Toluene
Butyric Acid	Freon (refrigerant & propellant)	Turpentine
Carbon Tetrachloride	Gasoline	Xylene
Carbon Disulfide	Lacquer Thinner	
Carboic Acid	Methyl Alcohol	
<b>Makrolon is dissolved by:</b>		
Chloroform	Dioxane	Methylene Chloride
Cresol	Ethylene Dichloride	Pyridine

Hidróxido de sodio = Sosa cáustica

Easy Off Pasta Limpiador de Hornos, 238g, amarillo/rojo	
<b>Ingredientes</b>	Agua, Hidróxido de Sodio, Espesante y Fragancia
Marca	Easy Off

\*Informacion de COVESTRO

Ilustración 3. Reporte de falla Mabe [1].

Estas son las principales causas que contribuyen a la falla en las perillas de la parrilla de empotrar; calor generado por la combustión del quemador de gas, el uso de agentes limpiadores y abrir y cerrar la válvula de gas por medio de la perilla.

Para el desarrollo de esta tesis solo se realizará el estudio de transferencia de calor entre el quemador y la perilla de la parrilla de empotre, con la aplicación de un método numérico computacional.

## Objetivos.

---

### General.

El objetivo general será el estudio y experimentación de transferencia de calor entre el quemador y la perilla de la parrilla de empotrar.

### Específicos.

- Análisis de transferencia de calor entre quemador y perilla.
- Estudio y obtención de emisividad térmica de perilla.
- Estudio y obtención de radiación en perillas.
- Análisis numérico computacional de combustión en quemador de gas.
- Análisis numérico computacional de transferencia de calor entre quemador y perilla.

### Alcance.

Con este proyecto se pretende mejorar el diseño de las perillas que representará un mejor producto para la compañía y para el mercado, reduciendo las llamadas de servicio por este tipo de fallas. Esta mejora solo aplicará para parrillas de empotrar.

### Antecedentes.

La iluminación en perillas en la compañía se ha ido incorporando al mercado durante los últimos años (2016 al 2021), Mabe entra en la necesidad de brindar este atributo a sus productos de media y alta gama, dado que modelos de las marcas LG, Whirlpool, Koblenz, tienen atributos similares en el mercado.

Cuando Mabe lanza a venta sus primeros productos de parrillas superiores con perillas iluminadas, las llamadas de servicio aumentan significativamente, la razón de estas llamadas es porque las perillas se empiezan a fisurar y romper generando molestias a los consumidores.

Mabe necesita crear diseños robustos que cumplan con las necesidades del mercado, por lo cual la investigación sobre la transferencia de calor, diseño, selección de materiales y la forma en que se pueda conducir la luminosidad a través de las perillas se vuelve un tema de investigación y desarrollo, el cual se resolverá por medio de una investigación de ingeniería.

## Estado del arte.

La investigación de estado de arte fue complicada, fue difícil encontrar información acerca de estufas con quemadores a gas y además que afectaran a “objetos” con calor o radiación, sin embargo el enfoque que se le dará al contenido es debido a los datos de entrada que se necesitan para el desarrollo del proyecto, en gran medida los datos que se necesitan conseguir son referentes a la transferencia de calor, con estos datos de entrada se podrían ir rediseñando los conceptos ya que parte de las fallas que trata este proyecto son debido a las altas temperaturas.

Se presentarán algunas investigaciones “similares” haciendo énfasis en electrodomésticos, específicamente estufas a gas y transferencia de calor. A continuación, se presentará la investigación de estado de arte.

El 13 de diciembre del 2014 John F. Hincapié y Manuel García del Grupo de investigación Mecánica aplicada de la universidad de Medellín Colombia (EAFIT). Presentan un modelo de transferencia de calor, el cual trata acerca de horno de con quemador a gas, la incógnita que tratan de resolver es saber la temperatura que tendrá la puerta del horno, variando la distancia entre los dos cristales que forman la puerta del horno [2].

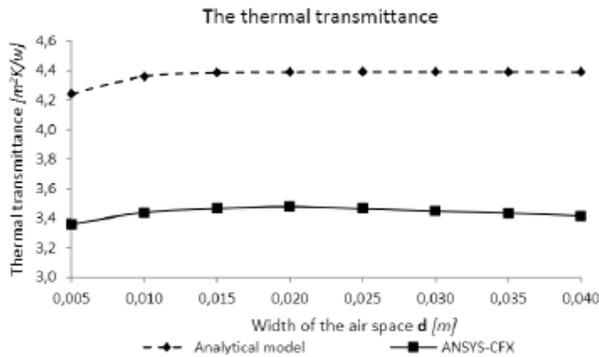


Fig 3. Validation of the numerical simulation model. The thermal transmittance.

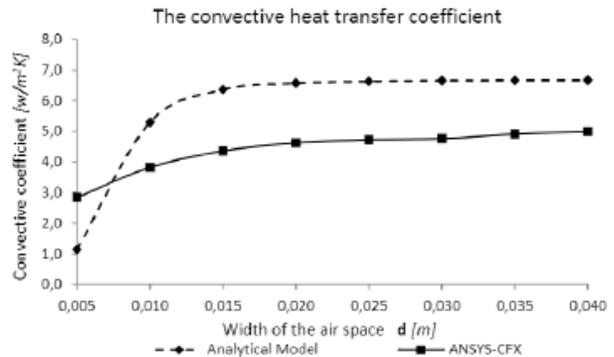


Fig 4. Validation of the numerical simulation model. The convective heat transfer coefficient between the glasses of the door.

Ilustración 4. Validación de modelo de simulación numérica [2].

Los gráficos que se presentan relacionan la distancia entre los cristales del horno y los resultados expresados en transmitancia térmica y el coeficiente convectivo asociado a cada variación de distancia. Esto es bastante interesante ya que la intención de variar la distancia entre los cristales es disminuir la temperatura en la puerta del horno que es una parte con la cual interactúa directamente el usuario, y si las temperaturas de la puerta fueran altas podría ocasionar problemas de seguridad al usuario, como quemaduras en las manos al momento de querer abrir la puerta.

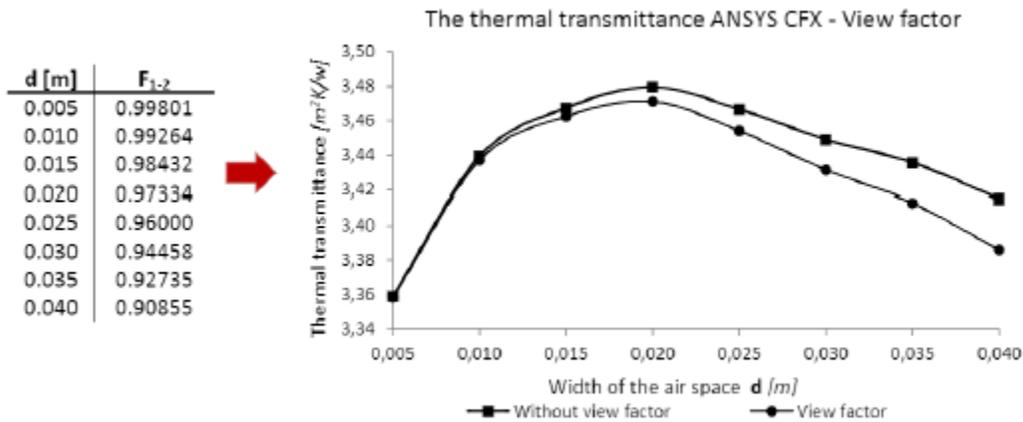


Ilustración 5. Correlación entre distancia de cristales y transferencia térmica [2].

Este grafico representa el factor de visión que se espera que se propague por radiación del quemador hacia la puerta del horno. Esta forma de transferencia de calor es importante ya que este fenómeno de radiación depende de la orientación del objeto que emite la radiación y la orientación de la superficie que recibe este calor [3].

Este estudio numérico que se presentó se asemeja de cierta manera al proyecto que se desea desarrollar, ya que ambos tienen una fuente de calor y una zona de estudio donde se desea conocer la temperatura, es decir se tiene el quemador a gas y la perilla que es el objeto donde se desea conocer la temperatura.

La siguiente investigación, se presenta el 24 de septiembre del 2010 por Iván Vera Romero y Javier Eduardo Aguillón Martínez plantean un análisis preliminar de transferencia de calor en una estufa Lorena. Donde el trabajo plantea una metodología de cómo monitorear la estufa para saber cómo se distribuye el calor en la estufa. La metodología de análisis se divide en tres grupos principales según los describen de la siguiente manera: comal y hornillas, estufa y chimenea. Las cuales a su vez fueron seccionadas en: comal y hornillas, paredes laterales, superficie inferior de la base, hogar-ambiente y chimenea (como comentario, en algunos países la palabra hornilla se refiere al quemador de gas) [4].

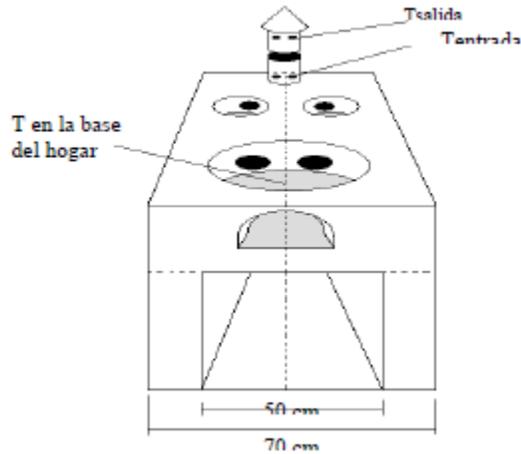


Ilustración 6. Esquema de Estufa Lorena [4].

El esquema de la estufa “Lorena” representa un boceto ilustrativo de la estufa real, tomando solo algunas dimensiones tratando de limitar los parámetros geométricos para hacer el análisis.

Tabla 2. Datos de campo

Temperatura promedio ambiental	15.75 °C
Tiempo de quema del combustible	7,500 s
Temperatura a 5 cm de la base de la chimenea	315.30 °C
Temperatura en la punta de la chimenea	112.00 °C
Temperatura promedio superficial del comal	144.35 °C
Temperatura promedio de la superficie inferior del comal	625.25 °C
Consumo de leña en el periodo experimental	4.15 kg
Temperatura promedio superficial del costado izquierdo de la estufa	37.40 °C
Temperatura promedio superficial superior de la hornilla izquierda	169.32 °C
Temperatura promedio superficial superior de la hornilla derecha	158.08 °C

Ilustración 7. Resultados de camp [4].

Los datos de temperatura que se presentan son los datos obtenidos de forma experimental, recopilados ante ensayos que se fueron realizando, y la metodología que fue delimitando cada sistema. Este trabajo separa por partes cada sección de la estufa, lo cual permite simplificar los cálculos para un sistema tan complejo.

Este trabajo tiene una relación importante con el proyecto si se ve desde el punto de vista experimental, ya que se podría tomar como referencia el cómo fueron seccionando cada sistema de la estufa para simplificar el fenómeno, es decir se podría en una primera instancia dejar de estudiar al mismo tiempo, la parrilla completa con sus respectivos recipiente de cocina y Perillas. Para simplificar el fenómeno se podría proponer dividir a solo un quemador comal y una perilla.

El siguiente trabajo se presentó el 5 de Julio del 2010 por Daniel Joseph Zube, del departamento de ingeniería mecánica de la universidad estatal de colorado, presentando la tesis: eficiencia de transferencia de calor de estufas de biomasa (heat transfer efficiency of biomass cookstoves), donde en el capítulo 3 hace mención importante de la transferencia de calor [5].

Fundamental physics governing heat transfer in biomass cookstoves”. En este capítulo describe cada forma de transferencia de calor y en los apéndices de esta tesis describe detalladamente las características y cada una de las ecuaciones que se acomodan a cada fenómeno usando como medio de análisis el programa Math CAD [5].

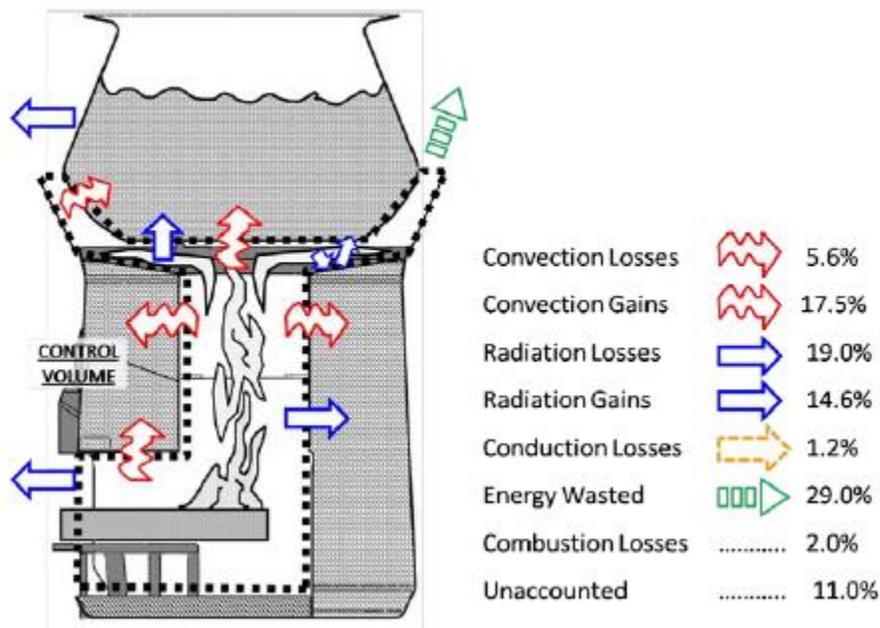


Ilustración 8. Balance de energía en estado estacionario con contribuciones de transferencia de calor [5].

La imagen de balance de energía hace referencia precisamente a eso a la primera ley de la termodinámica, y la importancia de caracterizar de la forma más precisa cada proceso, en el fenómeno de combustión. En los fenómenos exotérmicos y de combustión es bastante complicado poder hacer el balance de energía, aunque es necesario poder aproximar por métodos numéricos persiguiendo los principios de transferencia de calor.

El 29 de junio del 2018 L.Boccaccini, J.Quiñonez y A. Hernandez presentan el trabajo “Estudio experimental de la radiación térmica emitida por una estufa de alto rendimiento”.

El presente trabajo expone los avances realizados en el estudio del comportamiento térmico y de la cantidad de potencia emitida por una estufa de alto rendimiento en condiciones estacionarias de funcionamiento. Hacen un mapeo para la obtención de datos térmicos en la estufa “rusa” por medio de una cámara termográfica infrarroja y un pirómetro. Con estos instrumentos de medición van obteniendo y comparando las emisividades térmicas de los materiales según los esperado con las tablas del libro Incropera F. P.; DeWitt, también van obteniendo temperaturas superficiales de todas las paredes de la estufa con el fin de ir representando un mapeo de todas las zonas de interés [6].

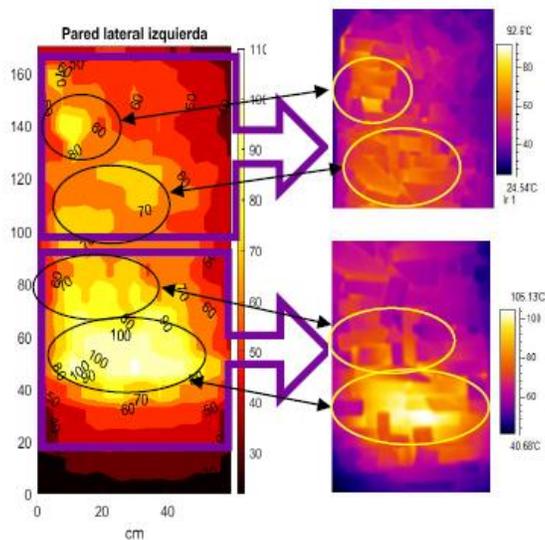


Ilustración 9. Mapa de Isotermas. Imagen termográfica [6].

Este Mapa de temperaturas revela la distribución de temperaturas, y esto se podría aplicar al proyecto revelando temperaturas donde el acceso a termopares sea complicado y pudiera ser necesario obtener temperaturas, entonces se podría utilizar el proceso de obtención de temperaturas por medio de una termografía.

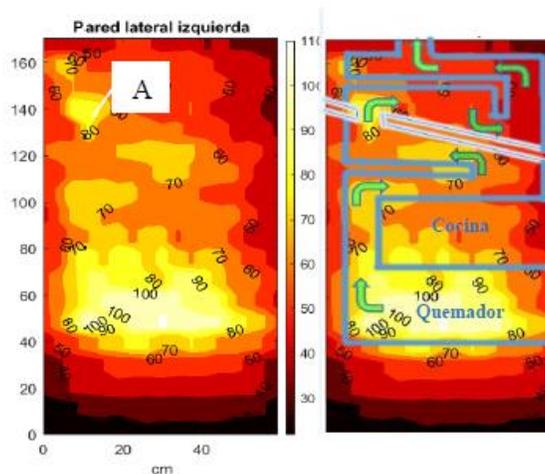


Ilustración 10. Mapeo de temperaturas superficiales. Representación de circulación de humos [6].

La importancia de estas imágenes es que muestran de una manera visual toda la distribución de temperaturas y ayuda a comprender donde están las zonas más calientes, de cierta manera si no se tuvieran estas termografías sería común hacer suposiciones de cómo se podría distribuir la temperatura, monitoreando con termopares o tocando directamente con la mano, aunque no se tuviera la certeza de un punto a otro donde no se tuviera un termopar.

## Conclusiones de estado de arte.

El tema de investigación abarca al menos tres tipos de materias en ingeniería; transferencia de calor, materiales plásticos y óptica, debido a esta gran cantidad de información se complica querer acotar a temas específicos dado la complejidad de cada una de estas materias.

Por lo que la investigación de estado de arte se da al enfoque de obtención de entradas para el diseño, es decir dado que uno de los fenómenos a solucionar en este proyecto es debido a la transferencia de calor, se buscan diferentes tipos de documentos los cuales tengan investigaciones sobre transferencia de calor y sobre todo fenómenos similares a los que se buscan resolver, fenómenos en estufas con quemadores a gas.

Las investigaciones si bien no aportan mucha información para lo que se quiere desarrollar en este proyecto al menos y en palabras describen algunos métodos e incluso aparatos para poder obtener información de la transferencia de calor en puntos específicos, esto es bastante importante, porque aunque no sea lógico, al principio de cualquier desarrollo es complicado establecer los primeros pasos para poder formar y darle estructura a la investigación, se entiende que al definir los objetivos de la investigación el camino podría ser claro, pero esto no es verdad, podría haber mil y una formas de darle solución al problema.

Y eso también se nota en el estado de arte de cada uno de los documentos citados, al parecer no hay un camino bien definido que se pueda seguir, aunque el fenómeno de estudio sea similar.

Cada investigación citada trabaja problemas bastante complejos y no dan mucha información ni siquiera en los resultados, no reflejan una correlación verdadera entre los cálculos o modelos matemáticos y los fenómenos físicos experimentales.

# Capítulo 1. Marco teórico.

---

## Transferencia de calor.

El calor se puede transferir de tres formas distintas: conducción, convección y radiación; se dará una descripción breve de cada uno de éstos para familiarizar al lector con los mecanismos básicos de transferencia de calor. Todos los modos de transferencia de calor requieren que exista una diferencia de temperatura es decir un gradiente de temperatura entre el emisor y receptor [7].

### Conducción.

Cuando dos partes de un material se mantienen a temperaturas diferentes, la energía se transfiere por colisiones moleculares de la más alta a la más baja temperatura. Este proceso de conducción es favorecido también por el movimiento de electrones libres en el interior de la sustancia, los cuales se han dissociado de sus átomos de origen y tienen la libertad de moverse de uno a otro átomo cuando son estimulados ya sea térmica o eléctricamente. La mayoría de los metales son eficientes conductores del calor porque tienen cierto número de electrones libres que pueden distribuir calor, además del que se propaga por la agitación molecular. En general, un buen conductor de la electricidad también lo es del calor [8].

La ley fundamental de la conducción térmica es una generalización de resultados experimentales relacionados con el flujo de calor a través de un material en forma de placa. Como lo explican se puede considerar una placa de espesor  $L$  y área  $A$ , una cara se mantiene a una temperatura  $t$  y la otra a una temperatura  $t'$ . Se mide la cantidad de calor  $Q$  que fluye en dirección perpendicular a la cara durante un tiempo  $\tau$ . Si se repite el experimento para diversos materiales de diferentes espesores y áreas de la cara, se pueden hacer algunas observaciones generales relacionadas con la conducción de calor [8].

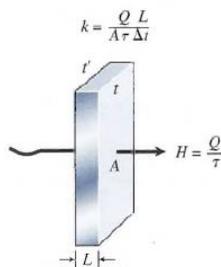


Ilustración 11. Medición de la conductividad térmica. Fuente: [8].

1. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo es directamente proporcional a la diferencia de temperatura ( $\Delta t = t' - t$ ) entre las dos caras.
  2. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo es directamente proporcional al área  $A$  de la placa.
  3. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo es inversamente proporcional al espesor  $L$  de la placa.
- Estos resultados se pueden expresar en forma de ecuación introduciendo la constante de proporcionalidad  $k$ .

$$H = \frac{Q}{\tau} = kA \frac{\Delta T}{L}$$

Ecuación 1. Razón de transferencia de calor H [8].

donde H representa la razón con la que se transfiere el calor. Aun cuando la ecuación se estableció para un material en forma de placa, también se cumple para una barra de sección transversal A y longitud L.

La constante de proporcionalidad k es una propiedad de cada material que se conoce como conductividad térmica. A partir de la ecuación anterior, se puede observar que las sustancias con alta conductividad térmica son buenas conductoras del calor, mientras que las sustancias con baja conductividad son conductoras pobres o aislantes [8].

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de sus interacciones. La conducción puede ocurrir en sólidos, líquidos o gases; en estos últimos dos la conducción se debe a las colisiones de las moléculas durante su movimiento aleatorio, mientras que en los sólidos se debe a la combinación de la vibración de las moléculas en una red y el transporte de energía mediante electrones libres [7].

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él [3].

## Ley de Fourier de conducción de calor.

### Difusividad térmica.

El producto  $\rho c_p$ , que se encuentra con frecuencia en el análisis de la transferencia de calor, se llama capacidad calorífica de un material. Tanto el calor específico  $c_p$  como la capacidad calorífica  $\rho c_p$  representan la capacidad de almacenamiento de calor de un material. Pero  $c_p$  la expresa por unidad de masa, en tanto que  $\rho c_p$  la expresa por unidad de volumen [3].

En el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio es la difusividad térmica, la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material y se define como [3].

$$\alpha = \frac{\text{calor conducido}}{\text{calor almacenado}} = \frac{k}{\rho c_p} \quad \left( \frac{m^2}{s} \right)$$

Ecuación 2. Difusividad Térmica [3].

La conductividad térmica k representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica  $\rho c_p$  representa cuánta energía almacena un material por unidad de volumen. Por lo tanto, la difusividad térmica de un material se puede concebir como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. Es obvio que un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor por el medio. Un valor pequeño de la difusividad térmica significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducida a través de él [3].

## Convección.

La convección se ha definido como el proceso por el que el calor es transferido por medio del movimiento real de la masa de un medio material. Una corriente de líquido o de gas que absorbe energía de un lugar y lo lleva a otro, donde lo libera a una porción más fría del fluido recibe el nombre de corriente de convección [8].



Ilustración 12. Ejemplo de la convección natural. [8]

Si el movimiento de un fluido es causado por una diferencia de densidad originada por un cambio de temperatura, la corriente producida se conoce como convección natural. El agua que fluye por la tubería de vidrio de la imagen anterior, se presenta una corriente de convección natural. Cuando un fluido es obligado a moverse por la acción de una bomba o unas aspas, la corriente producida se conoce como convección forzada [8].

## Ley de enfriamiento de Newton

Los procesos de transferencia de calor en los que hay un cambio de fase de un fluido se consideran también como convección debido al movimiento del fluido durante el proceso; por ejemplo, el ascenso de las burbujas de vapor durante la ebullición o el descenso de gotas de líquido durante la condensación [7].

La tasa de transferencia de calor por convección  $\dot{Q}_{conv}$  se determina a partir de la ley de enfriamiento de Newton, expresada como [7].

$$\dot{Q}_{conv} = h A (T_s - T_f) \quad W$$

Ecuación 3. Convección de calor [7]

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $A$  es la superficie en la cual tiene lugar la transferencia de calor,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_f$  es la temperatura del fluido lejos de la superficie. (En la superficie, la temperatura del fluido es igual a la temperatura superficial del sólido.) [7]

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  no es una propiedad del fluido, es un parámetro determinado de forma experimental cuyo valor depende de todas las variables que afectan la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad volumétrica del fluido [7].

## Radiación ley de Stefan-Boltzmann

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía en forma de ondas electromagnéticas originadas en el nivel atómico. Ejemplos de ondas electromagnéticas son los rayos gamma, los rayos X, las ondas de luz, los rayos infrarrojos, las ondas de radio y las de radar; la única diferencia que hay entre ellas es la longitud de onda [8].

La radiación térmica se debe a ondas electromagnéticas emitidas o absorbidas por un sólido, un líquido o un gas debido a su temperatura [8].

Todos los objetos con una temperatura superior al cero absoluto emiten energía radiante. A bajas temperaturas, la razón de emisión es pequeña y la radiación es predominantemente de longitudes de onda grandes. A medida que la temperatura se eleva, esa razón aumenta rápidamente y la radiación predominante corresponde a longitudes de onda más cortas [8].

Las mediciones experimentales han demostrado que la razón a la que es radiada la energía térmica desde una superficie varía directamente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo radiante. Dicho de otro modo, si la temperatura de un objeto se duplica, la razón con la que emite energía térmica se incrementa dieciséis veces [8].

Un factor adicional que ha de considerarse al calcular la razón de transferencia de calor por radiación es la naturaleza de las superficies expuestas. Los objetos que son emisores eficientes de la radiación térmica son también eficientes para absorberla. Un objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre su superficie se llama absorbedor ideal. Un objeto de este tipo será también un radiador ideal. No existe un absorbedor

realmente ideal; pero, en general, cuanto más negra sea una superficie, tanto mejor absorberá la energía térmica [8].

La radiación emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro. Aunque tales cuerpos no existen en realidad, el concepto es útil como un patrón para comparar la emisividad de diversas superficies [8].

## Emisividad

La emisividad  $\epsilon$  es una medida de la capacidad de un cuerpo para absorber o emitir radiación térmica. La emisividad es una cantidad adimensional que tiene un valor numérico entre 0 y 1, según la naturaleza de la superficie. En el caso de un cuerpo negro, es igual a la unidad. Para una superficie de plata perfectamente pulida el valor de la emisividad se aproxima a cero [8].

La razón de radiación  $R$  de un cuerpo se define formalmente como la energía radiante emitida por unidad de área por unidad de tiempo; dicho de otro modo, la potencia por unidad de área. En forma simbólica esto se expresa [8].

$$R = \frac{E}{\tau A} = \frac{P}{A}$$

Ecuación 4. Razón de Radiación [8].

Si la potencia radiante  $P$  se expresa en watts y la superficie  $A$  en metros cuadrados, la razón de radiación estará expresada en watts por metro cuadrado. Como ya lo hemos dicho, esta razón depende de dos factores: la temperatura absoluta  $T$  y la emisividad  $\epsilon$  del cuerpo radiante. El enunciado formal de esta dependencia, conocida como la ley Stefan-Boltzmann, se puede escribir como [8].

$$R = \frac{P}{A} = \epsilon \sigma T^4$$

Ecuación 5. Ecuación Stefan-Boltzmann [8].

La constante de proporcionalidad  $\sigma$  es una constante universal completamente independiente de la naturaleza de la radiación. Si la potencia radiante se expresa en watts y la superficie en metros cuadrados,  $\sigma$  tiene el valor de  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}^4$ .

# Macromoléculas

## Polímeros.

Las grandes moléculas sintéticas se forman al unir miles de pequeñas unidades moleculares conocidas como monómeros. El proceso de unir las moléculas se llama polimerización y el número de estas unidades en la molécula larga se conoce como el grado de polimerización [9].

Los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes. Los eslabones están formados, fundamentalmente, por átomos de carbono y pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos. Estas moléculas orgánicas son las que constituyen los materiales plásticos que conocemos y también los tejidos de los seres vivos (piel, músculos, tela de araña, seda, etc.) [10].

Las palabras polímeros y plásticos a menudo se toman como sinónimos, pero de hecho existe una distinción. El polímero es el material puro que resulta del proceso de polimerización y generalmente se toma como el apellido de los materiales que tienen moléculas en forma de cadena larga (y esto incluye cauchos). Los polímeros puros rara vez se usan solos y es cuando están presentes los aditivos que se aplica el término plástico. Los polímeros contienen aditivos por varias razones. La siguiente lista describe el propósito de los principales aditivos utilizados en plásticos [9].

## Clasificación de los polímeros

Hay diferentes maneras de clasificar a los polímeros. Podemos subdividir según su origen, o considerando la estructura de las macromoléculas o también según su uso [10].

**Naturales:** Son sustancias producidas por organismos vivos que se emplean sin modificación. Ejemplos de estos polímeros son: proteínas como las empleadas por las arañas para tejer su tela, polisacáridos, caucho natural [10].

**Sintéticos:** Son macromoléculas creados por el hombre y se dividen en dos categorías según su comportamiento al ser calentados: termoplásticos y termorrígidos. Los primeros al calentarse se ablandan o funden, y son solubles en disolventes adecuados. Están formados por moléculas de cadenas largas, a menudo sin ramificaciones. Los termorrígidos, en cambio, se descomponen al ser calentados y no pueden fundirse ni solubilizarse. Tienen estructuras elaboradas tridimensionales con reticulación [10].

Según su respuesta termo-mecánica, los materiales poliméricos se pueden clasificar en cinco grupos:

**Termorrígidos:** Los polímeros termorrígidos también denominados termoestables son polímeros reticulados durante la reacción de polimerización o mediante la introducción de entrecruzamientos químicos (cross links) [10].

Elastómeros: Los elastómeros también denominados cauchos o hules tienen un comportamiento térmico que puede variar de termoplástico a termorrígido según su estructura sea lineal o reticulada. La clasificación se realiza en base a su comportamiento mecánico: se trata de materiales poliméricos que tienen la capacidad de deformarse mucho más que el 300% en forma elástica, esto es, cuando se remueve la fuerza aplicada para estirarlos recuperan sus dimensiones originales [10].

Adhesivos: Tienen cierto grado de extensibilidad, alta adhesión, pero conservando cierto grado de cohesión. Suelen tener baja cristalinidad [10].

Recubrimientos de superficies: Sus características son similares a las de los adhesivos, pero además tienen gran resistencia a la abrasión. Se usan para proteger y decorar [10].

Fibras: Pueden tejerse o enlazarse para formar prendas dimensionalmente estables; es necesario que no cedan demasiado. Deben ser resistentes y con tendencia a la cristalización [10].

Termoplásticos Como su nombre lo indica, se comportan de manera plástica a elevadas temperaturas. Más aún, la naturaleza de sus enlaces no se modifica radicalmente cuando la temperatura se eleva, razón por la cual pueden ser conformados a temperaturas elevadas, enfriados y después recalentados o reconformados sin afectar el comportamiento del polímero. Los polímeros termoplásticos son lineales [10].

## Materiales termoplásticos.

En un material termoplástico, las moléculas en forma de cadena muy largas se mantienen juntos por fuerzas de Van der Waals relativamente débiles. Una imagen útil de la estructura es una masa de largas hebras de lana pegajosa distribuidas al azar. Cuando el material se calienta, las fuerzas intermoleculares se debilitan para que se convierta en suave y flexible y eventualmente, a altas temperaturas, es una masa fundida viscosa [9].

Cuando se deja enfriar el material, se solidifica de nuevo. Este ciclo de ablandamiento por calor y solidificación por enfriamiento puede repetirse más o menos indefinidamente y es una ventaja importante porque es la base de la mayoría de los métodos de procesamiento de estos materiales. Sin embargo, tiene sus inconvenientes porque significa que las propiedades de los termoplásticos son sensibles al calor. Una analogía útil que a menudo se utiliza para describir estos materiales es que, como la cera de las velas, se pueden ablandar repetidamente con el calor y solidificarán cuando se enfríen. Ejemplos de termoplásticos son polietileno, cloruro de polivinilo, poliestireno, nailon, acetato de celulosa, acetal, policarbonato, metacrilato de poli-metileno y polipropileno [9].

Una subdivisión importante dentro del grupo de materiales termoplásticos es relacionada con si tienen un cristalino (ordenado) o un amorfo (aleatorio) estructura. En la práctica, por supuesto, no es posible que un plástico moldeado tenga una estructura completamente cristalina debido a la compleja naturaleza física de las cadenas moleculares. Algunos plásticos, como el polietileno y nailon, pueden alcanzar un alto grado de cristalinidad, pero probablemente sean descritos con más precisión como parcialmente cristalino o semi cristalino. Los plásticos como el acrílico y el poliestireno son siempre amorfos. La presencia de cristalinidad en aquellos plásticos capaces de cristalizar es muy dependiente sobre su historial térmico y, por tanto, sobre las condiciones de procesamiento utilizadas para producir el artículo moldeado. A su vez, las propiedades mecánicas de los moldes son muy sensibles a si el plástico posee cristalinidad o no. En general, los plásticos

tienen una mayor densidad cuando cristalizan debido al empaquetamiento más cercano de las moléculas. Características típicas de Materiales cristalinos y amorfos se presentan enseguida [9].

Amorphous	Crystalline
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Broad softening range</i> – thermal agitation of the molecules breaks down the weak secondary bonds. The rate at which this occurs throughout the formless structure varies producing broad temperature range for softening.</li> <li>● <i>Usually transparent</i> – the looser structure transmits light so the material appears transparent.</li> <li>● <i>Low shrinkage</i> – all thermoplastics are processed in the amorphous state. On solidification, the random</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Sharp melting point</i> – the regular close-packed structure results in most of the secondary bonds being broken down at the same time.</li> <li>● <i>Usually opaque</i> – the difference in refractive indices between the two phases (amorphous and crystalline) causes interference so the material appears translucent or opaque.</li> <li>● <i>High shrinkage</i> – as the material solidifies from the</li> </ul>

Ilustración 13. Materiales amorfos y cristalinos [9].

<p>arrangement of molecules produces little volume change and hence low shrinkage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Low chemical resistance</i> – the more open random structure enables chemicals to penetrate deep into the material and to destroy many of the secondary bonds.</li> <li>● <i>Poor fatigue and wear resistance</i> – the random structure contributes little to fatigue or wear properties.</li> </ul>	<p>amorphous state the polymers take up a closely packed, highly aligned structure. This produces a significant volume change manifested as high shrinkage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>High chemical resistance</i> – the tightly packed structure prevents chemical attack deep within the material.</li> <li>● <i>Good fatigue and wear resistance</i> – the uniform structure is responsible for good fatigue and wear properties.</li> </ul>
<b>Examples of amorphous and crystalline thermoplastics</b>	
<b>Amorphous</b>	<b>Crystalline</b>
Polyvinyl Chloride (PVC) Polystyrene (PS) Polycarbonate (PC) Acrylic (PMMA) Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) Polyphenylene (PPO)	Polyethylene (PE) Polypropylene (PP) Polyamide (PA) Acetal (POM) Polyester (PETP, PBTP) Fluorocarbons (PTFE, PFA, FEP and ETFE)

Ilustración 14. Materiales amorfos y cristalinos [9].

## Policarbonato.

Estos materiales también pertenecen a la categoría de plásticos de ingeniería y su característica sobresaliente es la dureza extrema. Son transparentes y tiene buena resistencia a la temperatura, pero son atacados por soluciones de alcalinos y disolventes de hidrocarburos. Las aplicaciones típicas incluyen cubiertas de lámparas antivandálicas, biberones, carcasas y protectores de máquinas, piezas de cámaras, componentes eléctricos, equipos de seguridad y discos compactos [9].

### Propiedades [11].

Excelente resistencia al impacto.

- Muy buena resistencia al calor.
- Retardante a la flama.
- Excelente estabilidad dimensional.
- Buena resistencia a rayos uv.
- Transparente.
- Precio moderado y alto.
- Fácil de procesar.

### Aplicaciones [11].

- Componentes “auto - motivos” exteriores.
- Equipos de iluminación exterior.
- Placas y biseles.
- Ventanas de vehículos (no automóviles)
- Soportes y partes estructurales.
- Componentes y suministros médicos.
- Ventanillas antibalas.

Hay muchos tipos de policarbonato que satisfacen un amplio rango de requerimientos.

Es transparente en su estado natural, con una transmisión lumínica del 92%, muy cercana al cristal (Es usual la utilización del PC en ventanas para obtener resistencia a golpes y rayones). [11]

El PC admite retardantes a la flama con poca pérdida de sus propiedades incluyendo la transparencia, tiene sin embargo algunas desventajas como su regular resistencia a químicos, pues es atacado por muchos solventes orgánicos. Los tipos de PC no reforzados tienen una resistencia relativamente baja a la fatiga. [11]

## Makrolon.

Makrolon es la marca de un policarbonato, que se produce en todas las principales regiones económicas del mundo. Para el Makrolon, la mayoría e importantes regiones económicas son Asia-Pacífico (APAC), Europa, Medio Este, África y América Latina (EMEA / LA) y Norteamérica y México (NAFTA) [12].

En comparación con otros termoplásticos, el material amorfo Makrolon tiene un perfil de propiedades muy singular. Destaca sobre todo por su alta transparencia, resistencia al calor, tenacidad y estabilidad dimensional junto con una alta fluencia, módulo y buenas propiedades de aislamiento eléctrico. El Makrolon reforzado con fibra de vidrio tiene particularmente alta rigidez y excelente estabilidad dimensional [12].

## Aplicaciones del Makrolon.

Makrolon está disponible en: [12]

- ❖ Grados de propósito general.
- ❖ Grados de contacto con alimentos.
- ❖ Grados modificados por impacto.
- ❖ Grados ignífugos.
- ❖ Grados reforzados con fibra de vidrio (fibra molida).
- ❖ Grados reforzados con fibra de vidrio (fibra normal).
- ❖ Grados para aplicaciones especiales.
- ❖ Medios de almacenamiento ópticos.
- ❖ Lentes ópticos.
- ❖ Guías de luz.
- ❖ Encendiendo.
- ❖ Iluminación automotriz.
- ❖ Acristalamiento automotriz.
- ❖ Moldeo por soplado.
- ❖ Mueble.
- ❖ Extrusión.
- ❖ Espuma estructural.
- ❖ Dispositivos médicos.

## Propiedades del Makrolon.

Makrolon tiene las siguientes propiedades [12]:

Color inherente: Claro y transparente, como el vidrio.

Dureza: Sin muescas, sin fallas, alta resistencia al impacto con muescas.

Precisión y estabilidad dimensional: Excepcionalmente alto, ya que no hay cambios en las dimensiones, debido a la absorción de agua y post - contracción, alto módulo de fluencia, alta deflexión térmica, comportamiento isotrópico.

Resistencia al calor: Temperatura de transición vítrea hasta 148 ° C.

Resistencia a fuentes de ignición: Clasificación de fuego (dependiente del grado) a UL 94V-0 / 1,2 mm y UL 94-5VA / 3,0 mm; temperatura máxima en la prueba de hilo incandescente: hasta 960 ° C.

Aislamiento eléctrico: Resistividad volumétrica  $10^{14} \Omega \cdot m$ ; Rigidez dieléctrica hasta 36 kV / mm (1 mm de espesor).

## Quemadores de gas.

Muchos quemadores domésticos y algunos industriales usan llamas estabilizadas en la tobera, en una modificación del quemador Bunsen tradicional [13].

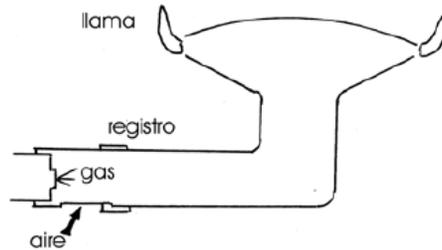


Ilustración 15. Quemador doméstico de gas.

El gas combustible induce su propia provisión de aire por un proceso de eyector (regulado por el registro), y los reactantes están premezclados al llegar a las toberas de quemado. La llama es estabilizada por la pérdida de calor al cuerpo del quemador. En estos quemadores son de especial interés los problemas de: [13]

Velocidad de la llama.

Estabilización de la llama (soplado y retroceso)

Radiación.

Ruido.

Emisión de contaminantes NOX.

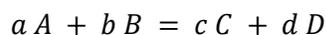
## Definición de reacción de combustión.

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente. El aire es el comburente más usual [13].

Si se supone (caso más común) que la combustión se realiza con aire, la reacción química que se debe plantear es la del proceso por el cual el combustible reacciona con el aire para formar los productos correspondientes, es decir, Combustible + Aire = Productos

Una forma general de plantear una reacción química es la siguiente:



Ecuación 6. Forma General de una reacción química [13].

donde las letras escritas en mayúsculas indican las sustancias químicas y las minúsculas indican la cantidad de moles de dichas sustancias. Se denominan genéricamente reactantes a las sustancias escritas antes del signo igual (A y B) y productos a las escritas detrás (C y D) [13].

## Descripción de modelos para simulación.

En este apartado se citarán algunos de los modelos que existen para la simulación, así como su descripción, sus usos y aplicaciones.

### Modelos de turbulencia.

Se han desarrollado varios modelos que se pueden usar para aproximar la turbulencia. Algunos tienen aplicaciones muy específicas, mientras que otros pueden aplicarse a una clase más amplia de flujos con un grado razonable de confianza. La aplicación de algunos modelos incorporados en el software se presenta a continuación [14].

#### Modelo Laminar.

Se aplica a flujos con bajo número de Reynolds (por ejemplo, para el flujo de tuberías, el régimen de flujo laminar es  $Re < 1000$ ).

Si configura una simulación usando flujo laminar, pero el flujo real es turbulento, la convergencia es difícil y la simulación no alcanzará la solución correcta. [14]

#### Modelo k-epsilon.

si bien el modelo k-epsilon, proporciona buenas predicciones para muchos flujos de interés de ingeniería, existen aplicaciones para las cuales estos modelos pueden no ser adecuados. Entre estos están: [14]

Flujos con separación de capa límite.

Flujos con cambios repentinos en la tasa de deformación media.

Flujos en fluidos rotativos.

Fluye sobre superficies curvas.

## Modelos de Radiación.

### Modelo de Transferencia Discreta (modo de transferencia S2S).

Descripción: Según este modelo, las superficies que forman el dominio son divididas en elementos de superficie desde los cuales se lanza un conjunto de haces discretos de rayos cubriendo todo el ángulo sólido hemisférico [14].

La ecuación de transferencia de calor por radiación se integra analíticamente a lo largo de longitudes espaciales discretas dentro de las cuales se considera que las fuentes de radiación son constantes. Esta integral debe repetirse hasta que el rayo alcanza una superficie opuesta del contorno del dominio [14].

Las cantidades físicas en cada elemento se supone que son uniformes. Estos rayos tienen que ser rastreados a través del dominio de la misma manera que el seguimiento de los fotones en el modelo de Monte Carlo. Por lo tanto, la descripción del modelo de Monte Carlo y de transferencia discreta es el mismo [14].

Hipótesis: La dispersión es isotrópica.

Método: Caminos de fotones desde las superficies de frontera se determinan al comienzo de la carrera. Con este método (isotrópico supuesto de dispersión), la intensidad se resuelve a lo largo de los rayos. Suponiendo un sistema isotrópico, la solución se extiende a todo el dominio donde la absorción, emisión y dispersión puede ser resueltos.

Limitaciones: falta de información de error es computacionalmente muy caro cuando hay demasiadas superficies para rastrear los rayos.

Beneficios: Los modelos no grises son tratados por el tratamiento de cada banda como un cálculo por separado. Mejor calidad de la solución de P1 y Rosseland Models, sobre todo cuando hay regiones ópticamente delgadas en el dominio.

## Modelo P1

Descripción: se resuelve una ecuación de transporte adicional [14].

- ❖ Hipótesis: Intensidad de radiación es isótropa o la dirección es independiente de la posición en el espacio.
- ❖ Método: a la ecuación de energía se añade un término de difusión.
- ❖ Limitaciones: Sólo es válido para el espesor óptico/ profundidad mayor que 1. No es válido para las paredes transparentes. Las necesidades de condiciones de contorno en todas las superficies externas.
- ❖ Beneficios: Válido para las superficies no-negro, las propiedades no constantes, la dispersión anisotrópica, y cerca de las paredes.
- ❖ Ejemplos: las llamas de combustible pulverizado (en las regiones fuera de las inmediaciones de la llama).

## Capítulo 2. Metodología

---

La metodología general de este proyecto estará basada en el sistema de desarrollo de proyectos y mejora continua Seis Sigma DMADOV, donde se presentarán cada una de las etapas que conforman a esta metodología.

Dentro de este capítulo también se presentarán las metodologías que permitirán sentar base para el desarrollo del proyecto, aunque estas metodologías estarán un poco más centradas en procesos puntuales y no tanto como para un desarrollo general, si no que estarán siendo muy específicas y enfocadas a pequeños procesos que darán el fundamento necesario para el desarrollo del proyecto.

### Metodología DFSS.

Se distinguen dos tipos de metodologías dentro de Seis Sigma. La metodología DMAIC cuando se trata de mejorar procesos o productos, y las metodologías DFSS, de las que la metodología DMADV es la más recurrida, que se utilizan cuando el producto o proceso no existe y requiere ser desarrollado, o existiendo, su eficacia o calidad es tan baja que requiere ser rediseñado completamente (reingeniería de procesos) [15].

No puede haber una buena calidad si no hay un buen diseño. La idea del DFSS (Design For Six Sigma) es anticiparse en la etapa de diseño de manera que se prevean y eviten las causas que pueden propiciar no conformidades [15] [16].

Dentro de DFSS existen varias metodologías, entre las que se encuentran las siguientes [15]:

- DMADV (Define, Measure, Analyze, Design, Verify). Probablemente es la más difundida y es una adaptación de DMAIC a un proceso de diseño. Por esta razón funciona bien cuando se aplica al diseño de nuevos procesos.
- IDOV (Identify, Define, Optimize, Validate). Probablemente sea esta la metodología que mejor se adapte a los casos de diseño de productos industriales.
- CQDFSS (Comercial, Quality, Design For Six Sigma). Se utiliza para la búsqueda y aseguramiento de la introducción de productos y servicios en el mercado.
- DCCDI (Define, Customer, Concept, Design, Implementation). Etc.

## Metodología DMADV.

La metodología utilizada para implementar el DFSS contempla las etapas: definir, medir, analizar, diseñar y verificar (DMADV), las cuales se describen brevemente a continuación [15] [17].

**Definir:** Identificar el nuevo producto, servicio o proceso a ser diseñado (o rediseñado). En esta fase se desarrollan actividades similares a las descritas para la etapa definir el ciclo DMAMC en donde se elabora el marco del proyecto [15] [17].

**Medir:** Planear y conducir las investigaciones necesarias para entender las necesidades del cliente o consumidor y los requerimientos relacionados. Trasladar estas necesidades y requerimientos en características de diseño factibles de ser medidas [15] [17].

**Analizar:** Analizar las opciones para que el proceso cumpla los requisitos y expectativas del cliente [15] [17].

**Diseñar:** Desarrollar los detalles del diseño. Evaluar la capacidad del diseño propuesto y desarrollar los planes para realizar la prueba piloto del nuevo producto o servicio rediseñado [15] [17].

**Verificar.** Comprobar las prestaciones del proceso diseñado y su capacidad para cumplir los requisitos y expectativas del cliente [15] [17].

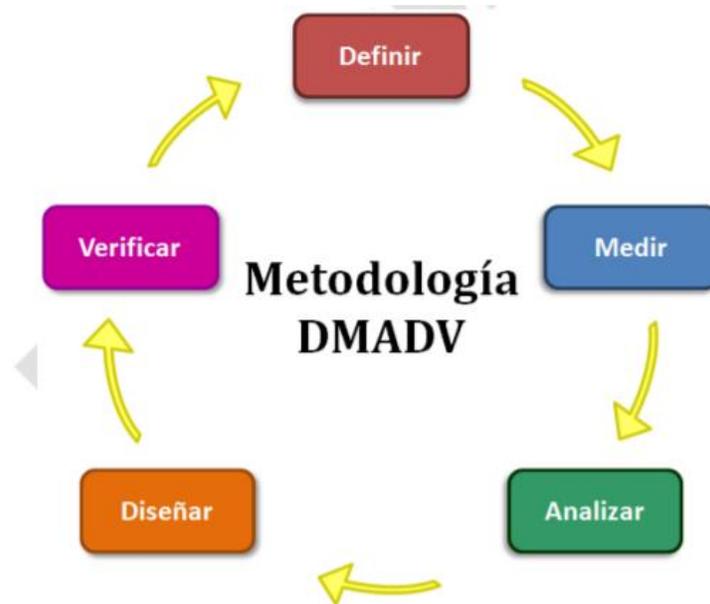


Ilustración 16. Metodología DEMADV [15].

Esta imagen muestra el proceso de la metodología DFSS, DMADV.

## Metodología de diseño 3D TOP DOW DESING.

El Top Down Design es un proceso de desarrollo de productos en el cual se ubica la información crítica en los niveles superiores del ensamble, y de este punto central se comunica a los subensambles. Permitiendo que se transmita la intención de diseño a todos los niveles, del ensamble ya sean sub-ensambles o partes finales [18].

En este proceso se busca que el diseñador empiece con un concepto de producto, y a partir de este, haga un proceso de detallado del ensamble en el cual debe pensar su diseño como un conjunto de relaciones entre sub-ensambles y partes [18].

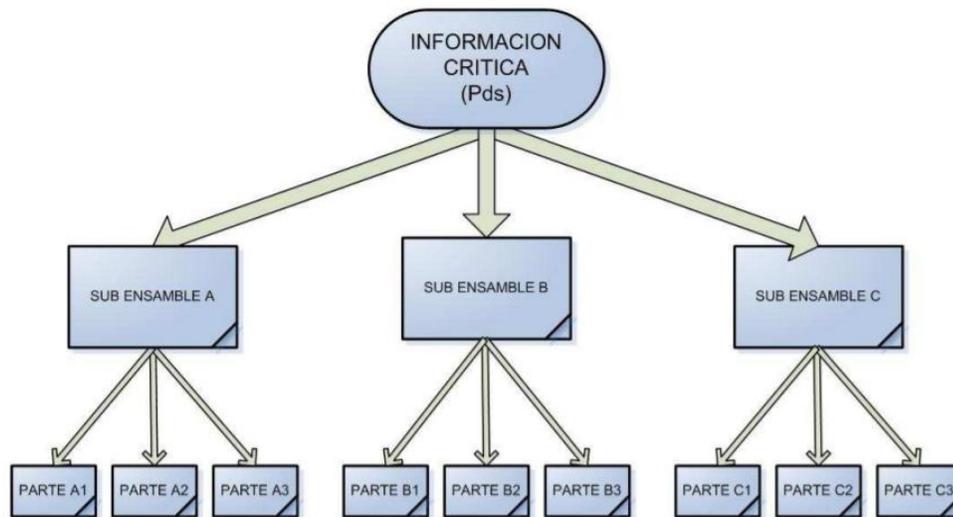


Ilustración 17. Diseño CAD con metodología TDD. [18]

Esta figura representa la jerarquía de partes, subensamble y ensamble principal que se aplica en la metodología TDD (top down desing). Y como es que a partir de cada parte se va ligando cada una de estas partes a subensambles que están conectados a un ensamble principal, el cual contiene toda la información [18].

Algunas de las ventajas que se tienen al utilizar esta metodología son [19]:

- ❖ Facilidad de la gestión de proyectos.
- ❖ Rápida respuesta a los cambios y gran flexibilidad a las modificaciones, gracias a que lleva a la aplicación del diseño modular.
- ❖ Captura de la información general del diseño en una locación central.
- ❖ Comunica la información de la estructura del sistema a los niveles más bajos.
- ❖ El esqueleto muestra claramente como está integrado cada módulo.
- ❖ Se generan menos errores en las operaciones, ya que hay una verificación en cada módulo.

- ❖ Mejora la comunicación entre ingenieros; esta es perfeccionada de manera substancial de dos maneras: primero, el uso de un sistema de modelo compartido en el cual todos verifican sus diseños elimina la mala comunicación que ocurre en la metodología Bottom Up.
- ❖ Brinda una mejor habilidad para administrar diseños complejos, que nace de la exploración del sistema y del mayor entendimiento de donde viene el diseño.

## Metodología de simulación.

### Análisis CFD.

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, Aero-acústica, etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico.

Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos [20].

### Aplicaciones del CFD en la Ingeniería

La Dinámica de Fluidos Computacional es ampliamente utilizada en los diferentes segmentos de la industria y soporta el proyecto y la fabricación de centenares de productos, tales como aviones, automóviles y navíos, así como los más diversos tipos de equipamientos industriales. La Mecánica de Fluidos Computacional puede ser utilizada desde la fase conceptual de un proyecto, ayudando a determinar la viabilidad y la mejor solución en producto, hasta la etapa de producción, permitiendo representar diversos escenarios. Con la ayuda de las herramientas de CFD es posible [20]:

- ❖ Simular difusión y convección de sustancias fluidas en los más diferentes ambientes
- ❖ Realizar la planificación y gestión de recursos hídricos
- ❖ Analizar la aerodinámica y aerotermodinámica de vehículos
- ❖ Evaluar la refrigeración de equipamientos, como reactores nucleares, motores etc.

### Metodología solucionador acoplado para simulación.

Para la metodología de la simulación que se utilizara es el solucionador “acoplado”. [21]

- Actualización de las propiedades del fluido en base a la solución actual (para la primera iteración estos valores coinciden con los iniciales) [21].
- Resolución simultanea de las ecuaciones de continuidad, cantidad de moviendo y energía y especies químicas en caso de ser necesario [21].

- Para los casos que sea necesario, se resuelven ecuaciones escalares para turbulencia y radiación, empleándose los valores previamente obtenidos [21].
- Se hace un chequeo de la convergencia. Si el proceso ha convergido no se realizan más iteraciones y si no lo ha hecho, se sigue iterando hasta obtener la convergencia deseada. En general, se necesitan un gran número de iteraciones para conseguir un nivel aceptable de convergencia [21].

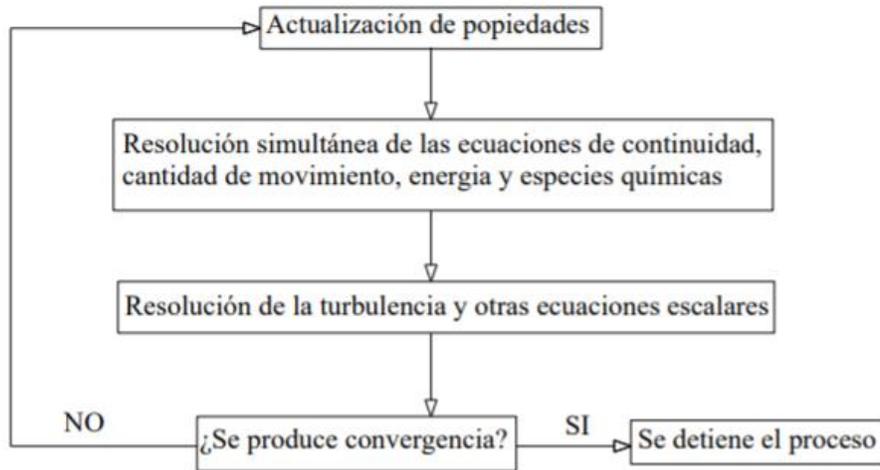
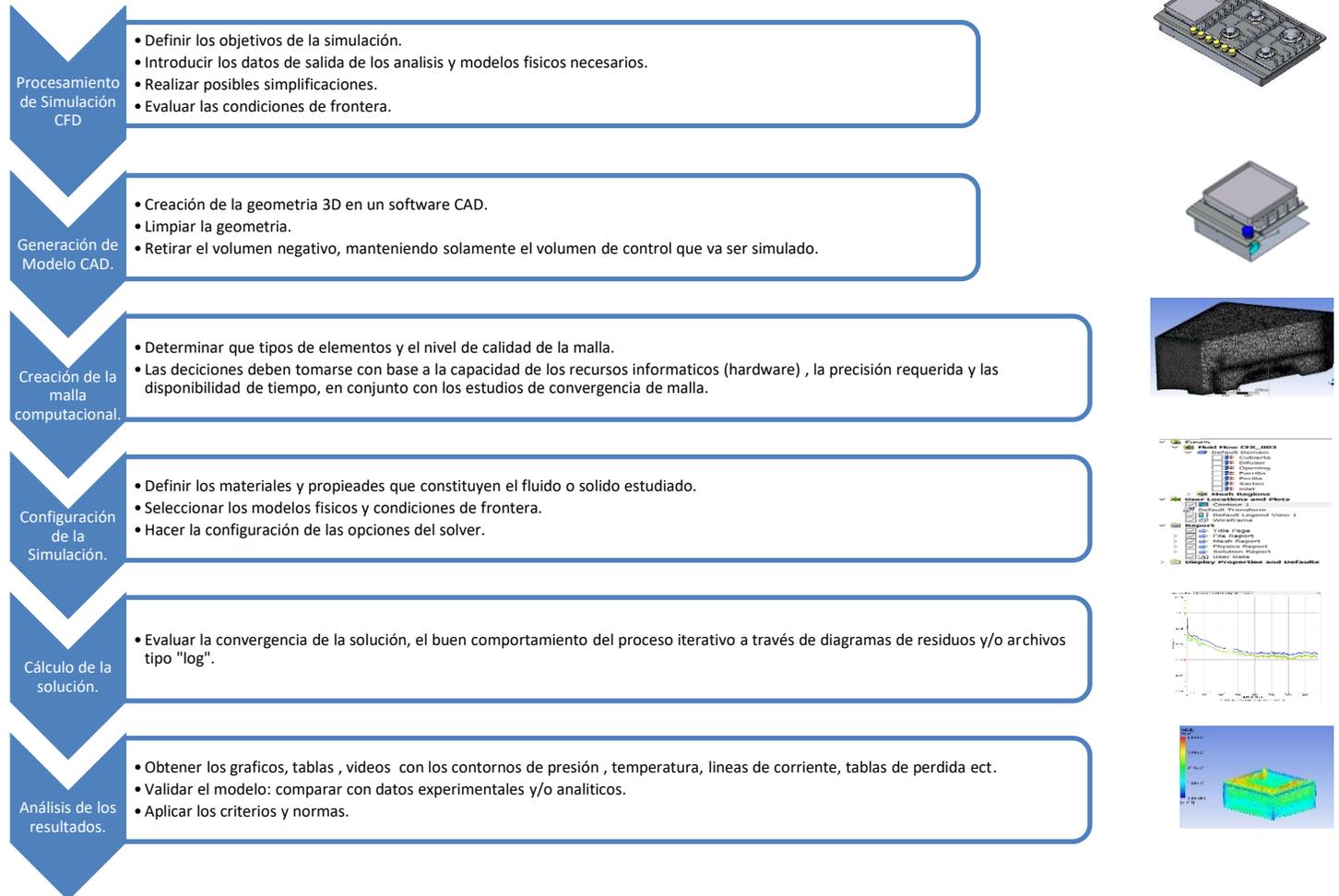


Ilustración 18. Proceso de cálculo del solver acoplado [21].

Este diagrama de flujo muestra el proceso de cálculo de un solucionador acoplado.

## Procesamiento de metodología de simulación.

Para el Procesamiento del método se ilustrará en el siguiente esquema el cual describe la manera en que se estará ejecutando cada acción para el correcto uso del método [20].



## Capítulo 3. Medición.

---

Para el desarrollo de esta investigación es imperativo tener datos reales ya que de esto dependerá tener la evidencia necesaria para poder hacer una comparación contra los modelos virtuales que se desarrollaran y saber que tan bueno es el modelo estimando el error que se tiene contra lo real.

Tener mediciones reales de los fenómenos que ocurren también ofrece la oportunidad de comprender de mejor manera las entradas y salidas de energía que tiene el sistema y por supuesto entender cómo se desarrolla el fenómeno.

Para la toma de mediciones también es necesario saber con qué instrumentos se pueden medir los fenómenos de calor, saber que rangos maneja cada instrumento y hasta es necesario conocimiento en la rama de instrumentación.

Parte importante de este proyecto también es definir el método y proceso de medición, definiendo los pasos, los instrumentos y el procesamiento de la adquisición de los datos.

### Medición de temperatura en perillas.

El primer experimento se realizó en una parrilla de 6 quemadores a gas la cual cuenta con un quemador triple ring y 5 quemadores estándar sobre una cubierta inoxidable, con este experimento se busca saber la distribución de temperaturas alrededor de las perillas, además de que nos estará arrojando información para las entradas del modelo matemático, nos estará dando un panorama sobre los puntos más calientes y como es que en el tiempo esta temperatura va incrementando.

El experimento se realiza bajo las condiciones de operación según la imagen1. (Experimento Mabe transferencia de calor).



Ilustración 19. Parrilla de empotrar IO Mabe.

Es importante mencionar que la capacidad térmica de estos quemadores mientras que las válvulas estén en la posición de apertura máxima, serán para cada quemador de:

Capacidad térmica del quemador Triple Ring es de 10,500 kJ/h.

Capacidad térmica del quemador Jumbo es de 8,000 kJ/h.

Capacidad térmica del quemador Estándar 6,500 kJ/h.

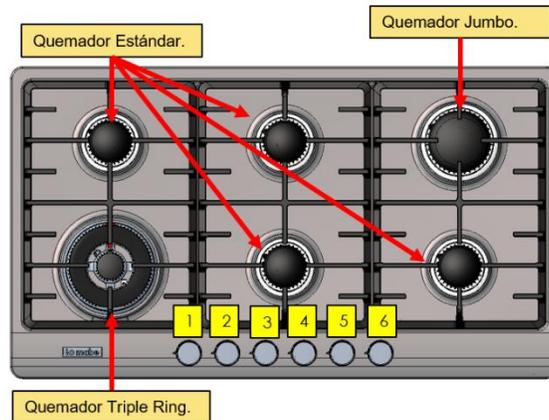


Ilustración 20. Parrilla de empotrar IO Mabe, e identificación de perillas.

Este experimento se realiza en la ciudad de Querétaro, Querétaro, a una temperatura ambiente cerca de los 30° C y a una presión atmosférica de 82.114 kPa, los instrumentos de medición son termopares tipo J con un rango máximo de temperatura desde 0 hasta 750°C con un límite de error para cable estándar de 2.2°C o 0.75% [22].

Estos datos serán recolectados por un analizador de datos HYDRA Sistema de obtención de datos/multímetro digital 2638A Hydra Series III con una exactitud de termopar de 0.5°C [23].



Ilustración 21. Hydra Series III [23].

La toma de datos obtenidos se presentará a continuación, separados por cada perilla, esto para poder tener una facilidad de lectura de datos y una mejor comprensión de estos. La identificación de perillas se muestra en la ilustración 18. La identificación del termopar se presenta en la siguiente imagen 20, se colocan los termopares en los puntos cardinales de la perilla, (norte, sur, este y oeste), y un termopar más en el difusor de la perilla.

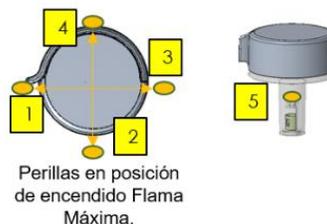


Ilustración 22. Identificación de termopar en perilla.

Es importante mencionar que parte del método de medición es tomado de la norma NOM-010-SESH-2012, descrito en el inciso 6.11 (Temperaturas) y de acuerdo con los numerales 6.11.6 y conforme al método de prueba del numeral 8.11 (Temperaturas en las partes exteriores) [24].

Se cita el procedimiento de la siguiente manera:

En parrillas de empotrar o sobreponer, debe colocarse sobre cada uno de los quemadores de la sección superior el utensilio de prueba, con 2 kg de agua con una tolerancia de + 0.1 kg a temperatura ambiente. Todos los quemadores de la sección superior deben encenderse al 50% de su capacidad nominal y operarse durante 1 h. Si el aparato cuenta con quemador de comal, dicho quemador debe encenderse en su posición máxima a los 30 min de haber iniciado la prueba [24].

Sin embargo, para estas pruebas se agrega una variación, la cual consiste en poner dos sartenes en los quemadores frontales laterales y prender los quemadores al máximo, además el tiempo de prueba se extenderá hasta que se encuentre en un sistema estacionario y no transitorio.

Para la perilla número 1 se presentan los muestreos de temperatura, medidos en grados centígrados y monitoreados en minutos.

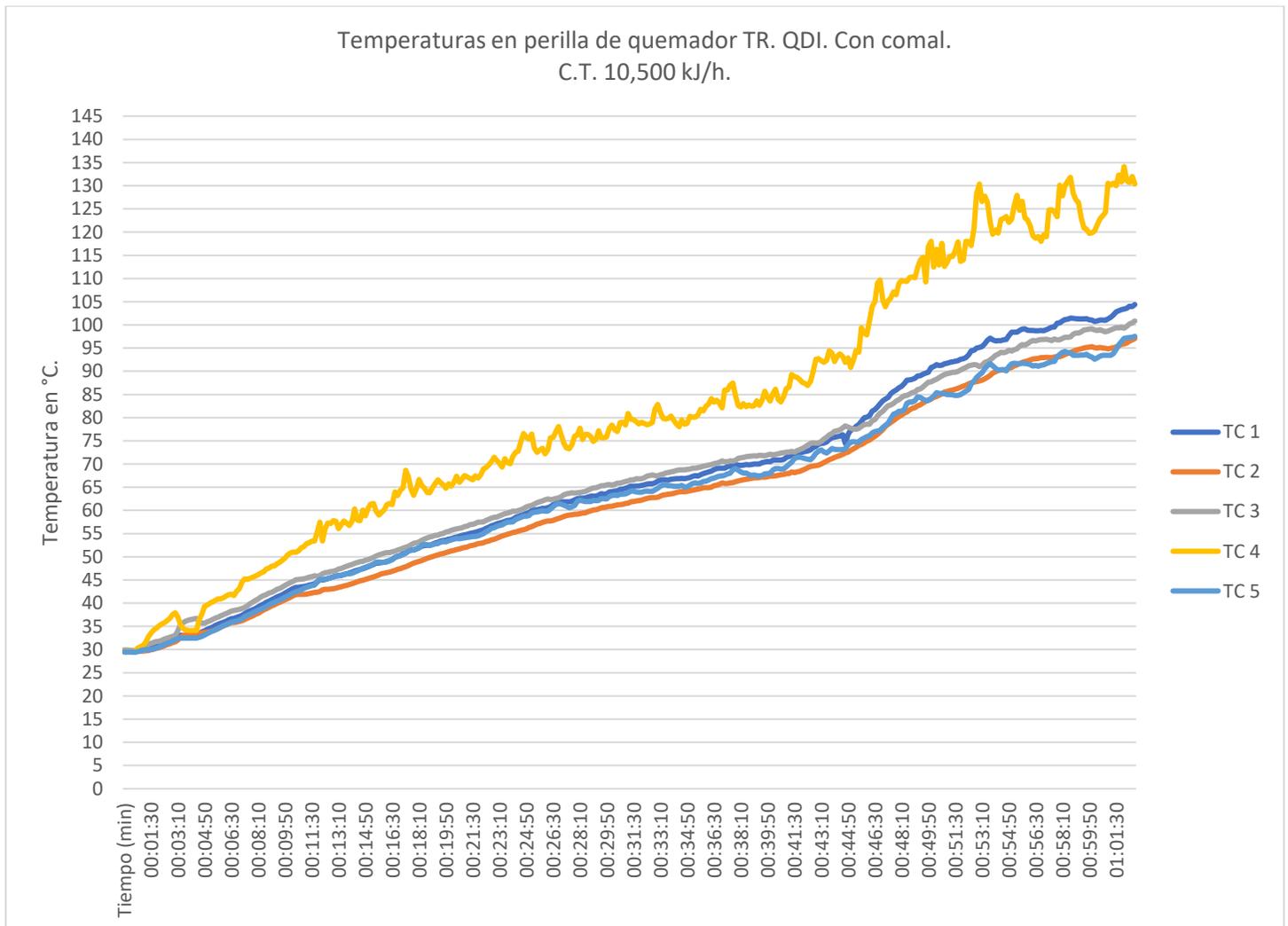


Ilustración 23. Gráfico temperaturas en perilla 1.QDI.TR

Los resultados de la medición presentan un sistema de transferencia de calor transitorio, se observa que en el termopar 4 (mostrado en color amarillo) la temperatura al tiempo de 60 minutos alcanza una temperatura de 130 °C y el grafico no indica una estabilización de la temperatura, por los datos observados se puede intuir que si el tiempo de prueba se incrementara esta temperatura seguiría creciendo.

Se presentan los resultados de temperatura de la perilla número 6, la cual también tiene un sartén al igual que el quemador triple ring y no una cacerola como los demás quemadores, los resultados que se obtuvieron son los siguientes.

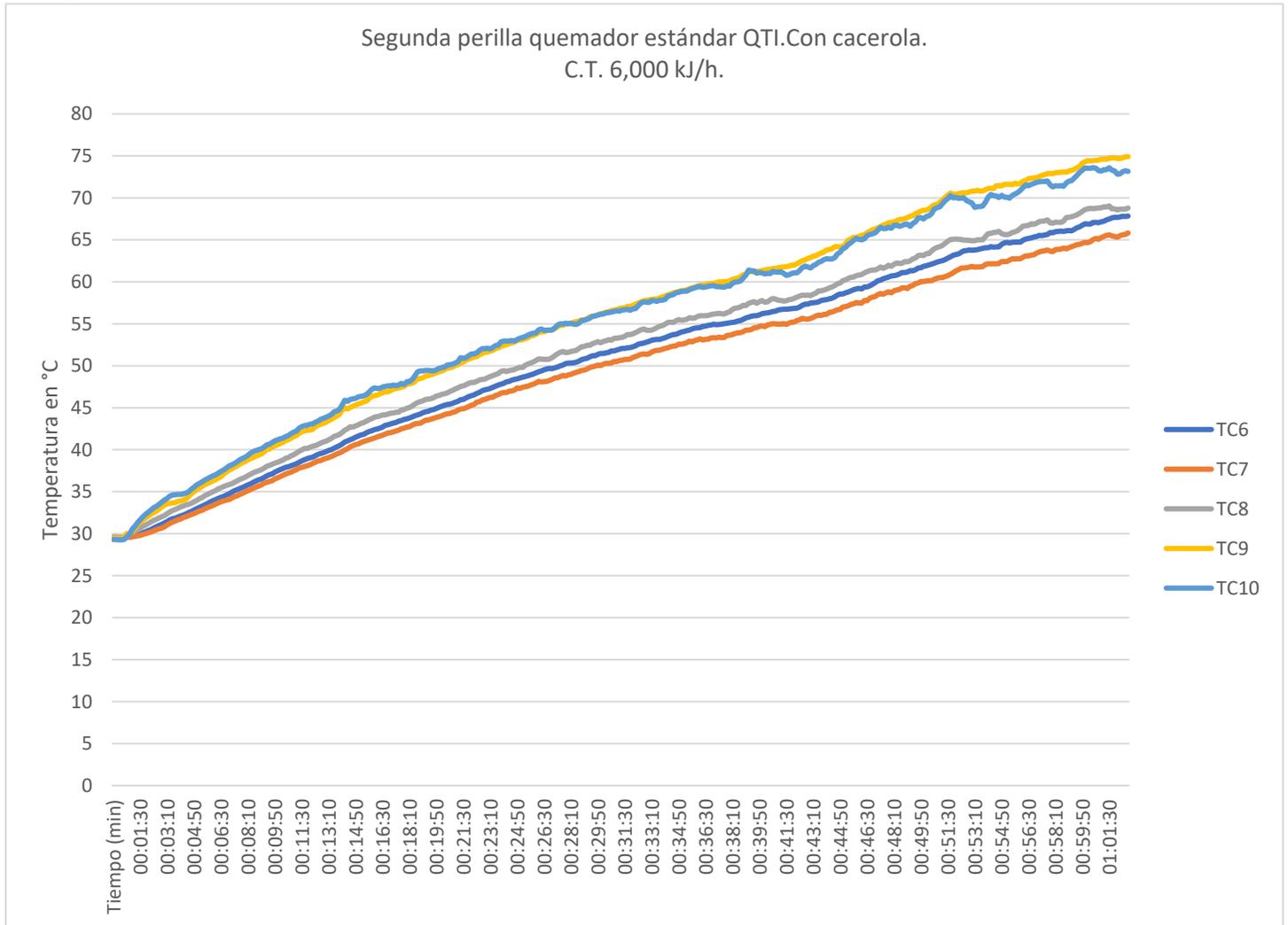


Ilustración 24. Gráfico temperaturas en perilla 6.QDD estándar.

Como se observa en la gráfica también esta perilla es afectada drásticamente por la radiación térmica, llegando a una temperatura de 120 °C y tampoco los datos alcanzan una curvatura de estabilización, por lo que se nota también están en un proceso transitorio de transferencia de calor.

Los resultados de la segunda perilla son los siguientes: se nota una uniformidad o distribución de temperaturas más “cerrada”; la temperatura máxima alcanzada en esta perilla es de cerca de los 73 °C.

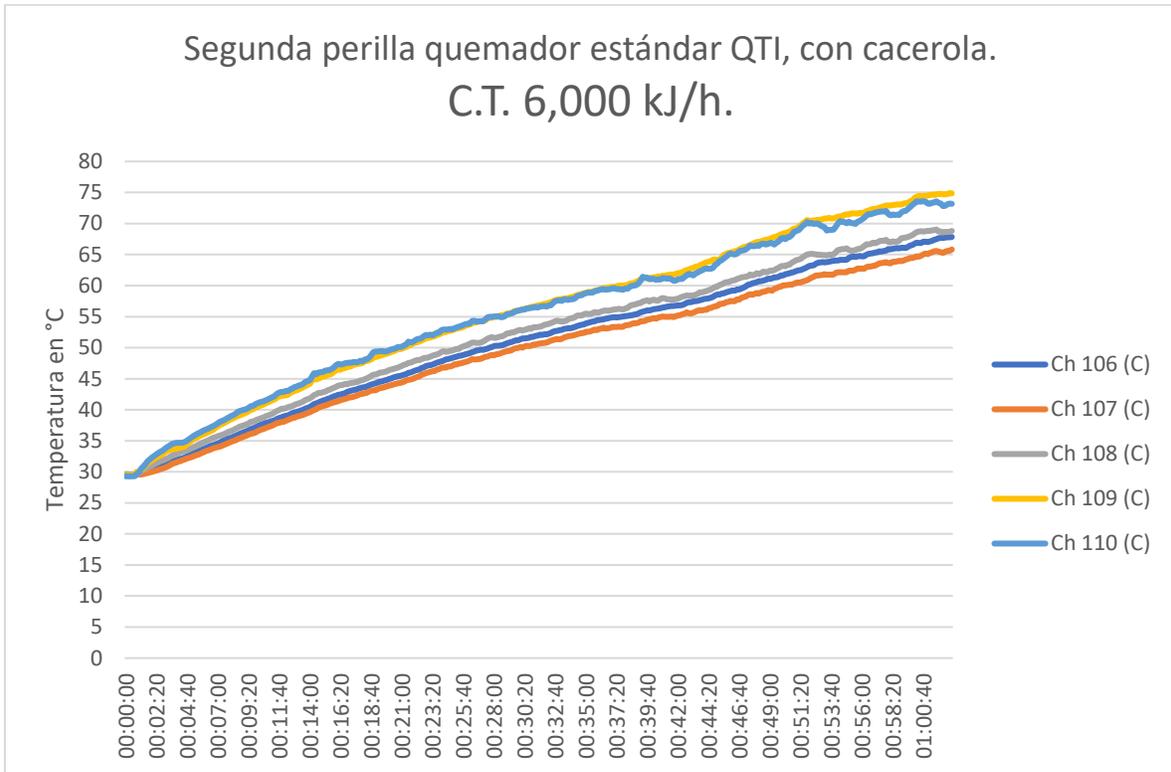


Ilustración 25. Gráfico temperaturas en perilla 2. QTI estándar.

Solo se presentan de manera detallada estos tres resultados, (de la perilla 1,2 y 6) para resaltar las temperaturas más altas que se tienen y para hacer contraste con la perilla número 2 que demuestra menores temperaturas y una uniformidad con respecto al tiempo, aunque tampoco demuestra una estabilización de temperaturas, tal pareciera que si el experimento fuera prolongado a más de 60 minutos la temperatura seguiría subiendo. (Los demás resultados se presentarán en el Anexo de este trabajo).

A continuación, se presentan los resultados de temperaturas máximas alcanzadas en este experimento para las perillas como un resumen de todas las temperaturas máximas registradas. Esta imagen ilustrativa muestra que en las posiciones donde hay sartenes y no cacerolas es donde las perillas alcanzan una temperatura notablemente más alta que en las demás posiciones.

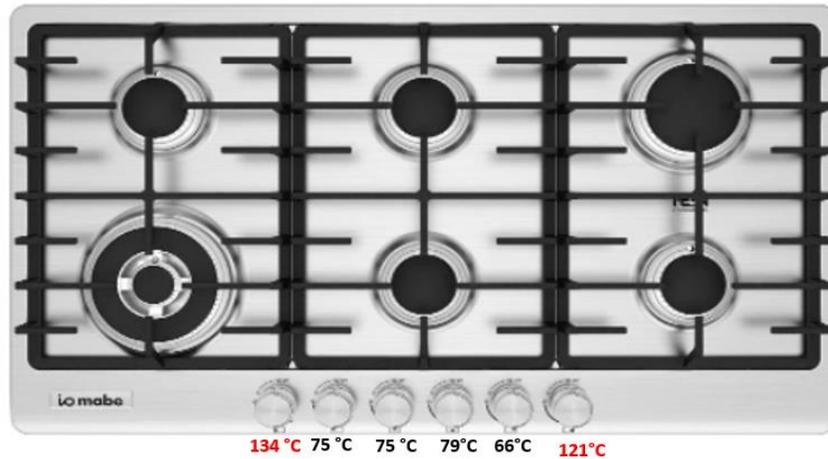


Ilustración 26. Gráfico temperaturas Máximas en perillas.

Además del sondeo de temperaturas en las perillas también se registraron las temperaturas ambientes entre las perillas, las cuales se presentan a continuación.

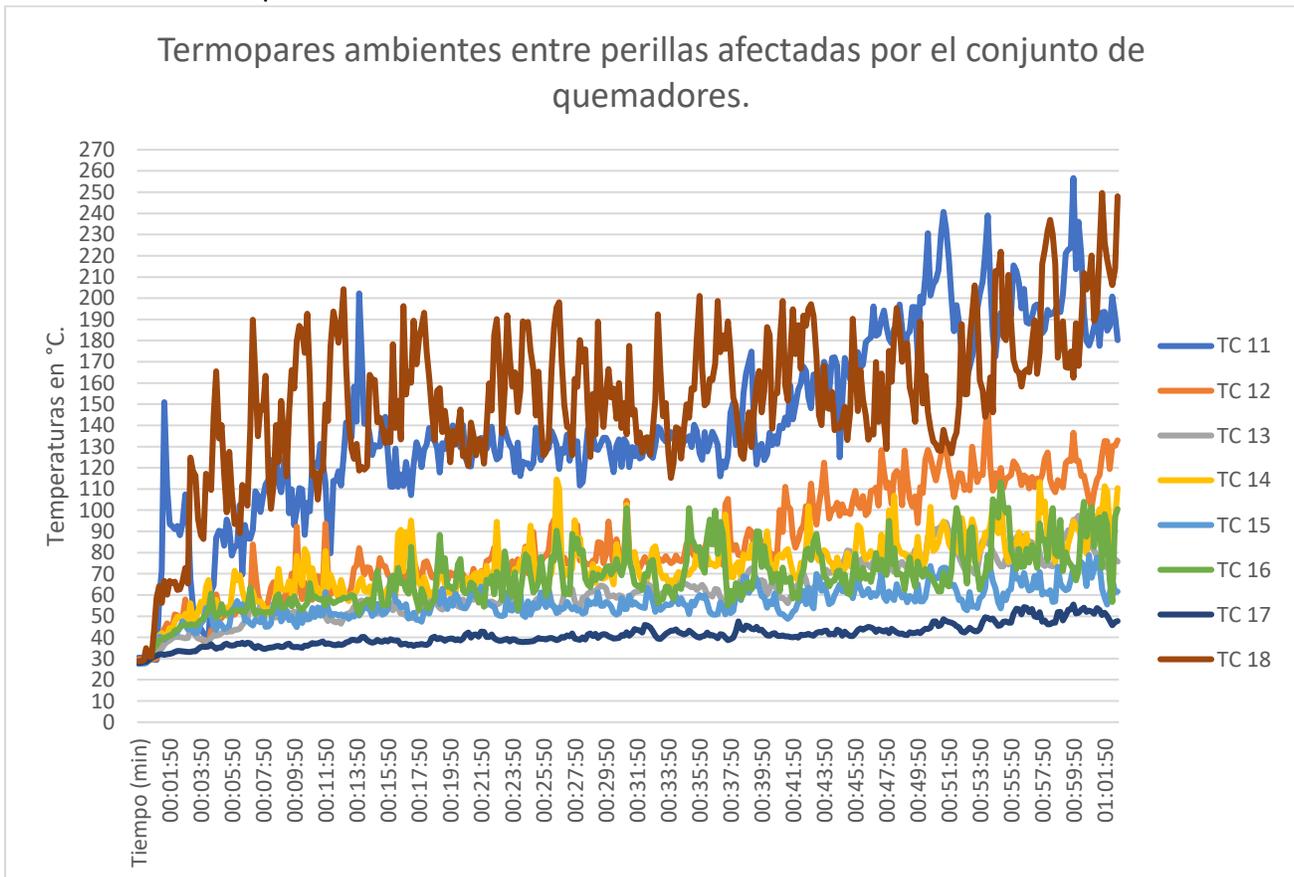


Ilustración 27. Temperaturas ambientes entre perillas.

El gráfico de temperaturas ambientes muestra bastante variación picos y bajadas, esto se debe a algunas ventiscas de aire durante el experimento, se podría decir que en la posición donde está el termopar recibiendo el calor del quemador, el aire por medio de convección natural enfría esa zona, por eso las bajadas tan drásticas que se pueden apreciar.

La siguiente ilustración resume las temperaturas alcanzadas máximas de los termopares ambientes. Justo en las posiciones que se marcan con un círculo verde en la imagen. Se puede apreciar que las temperaturas más altas también se registran en las perillas donde el quemador tiene sartenes y no cacerolas siendo estas las temperaturas de 256°C en la posición de la perilla del triple Ring y 250°C en la posición del quemador estándar frontal derecho.

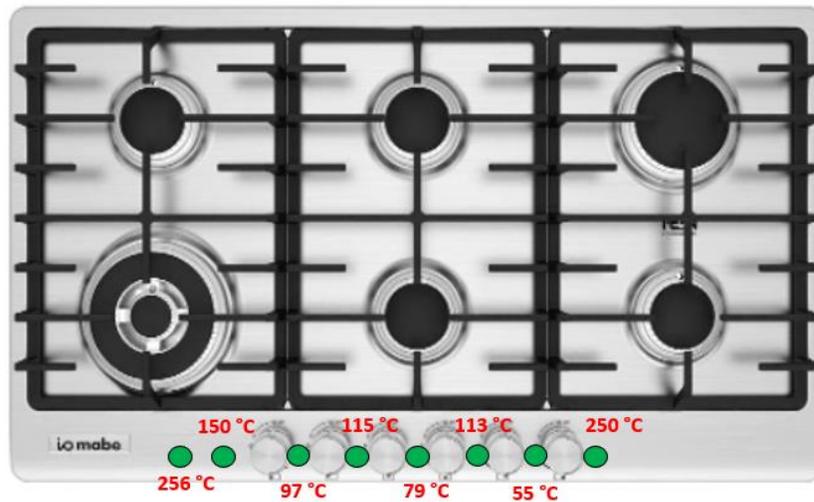


Ilustración 28. Temperaturas máximas ambientes entre perillas.

Dada la complejidad de estudio del proyecto, se reduce el experimento a encender un solo quemador a la vez, es decir se considera de un sistema general a uno particular. Tomado en cuenta la perilla que tiene mayor temperatura, el experimento se aísla a encender solo el QTR. Y los demás quemadores apagados, las cacerolas y sartenes se mantienen en su posición.

Cabe mencionar que el siguiente experimento se reduce mucho en el sentido de tiempo, ya que la instrumentación ya está hecha en la perilla, y solo bastara con encender el quemador para la perilla de estudio y el registro de los datos que de alguna manera ya es "automática".

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la primera perilla, y QTR.

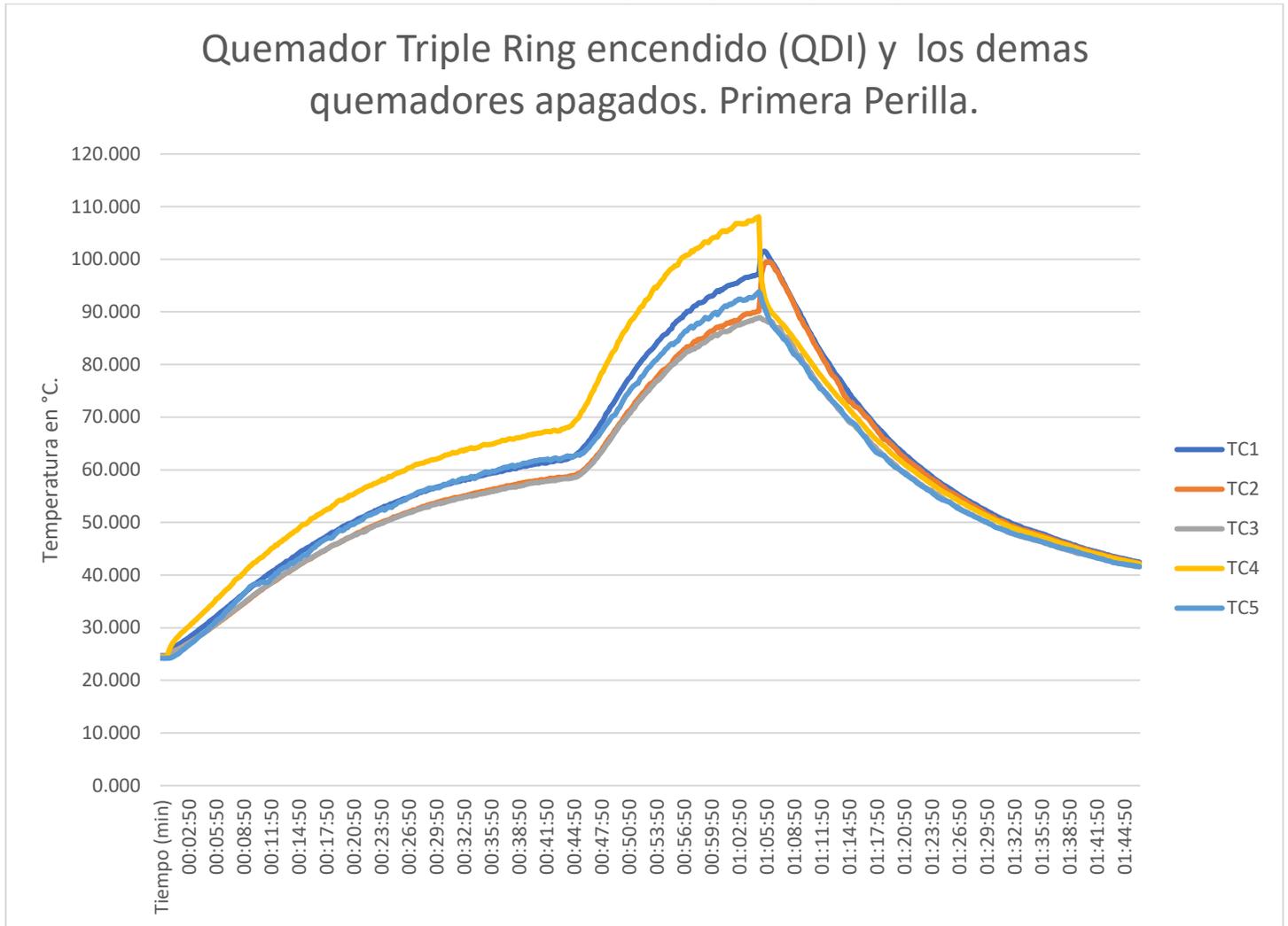


Ilustración 29. Gráfico de temperaturas, QTR encendido y los demás quemadores apagados.

Se nota que la contribución de calor del QTR para la perilla numero 1 es bastante fuerte ya que la diferencia en comparación de cuando se prenden todos los quemadores es de aproximadamente 30 °C. la temperatura sigue siendo muy alta casi de los 108°C al tiempo de una hora y tampoco hay estabilización de temperatura siguen en un estado transitorio, hay una forma de curva muy interesante en este ensayo, en el minuto 47 se nota que la temperatura aumenta mucho más rápido, en comparación del minuto 0 al minuto 47, esto es debido al que el sartén contenía agua, y cuando el agua se evaporo, ya no hubo una masa que disipara cierta cantidad del calor, por lo que la tendencia de temperatura fue subir más rápido en la perilla. Se concluye que tener el agua en el sartén también influye en la temperatura por lo que para los próximos experimentos no se le pondrá agua en el sartén, solo en las cacerolas.

Se muestran los resultados para la segunda perilla, donde solo recibe el calor del QTR.

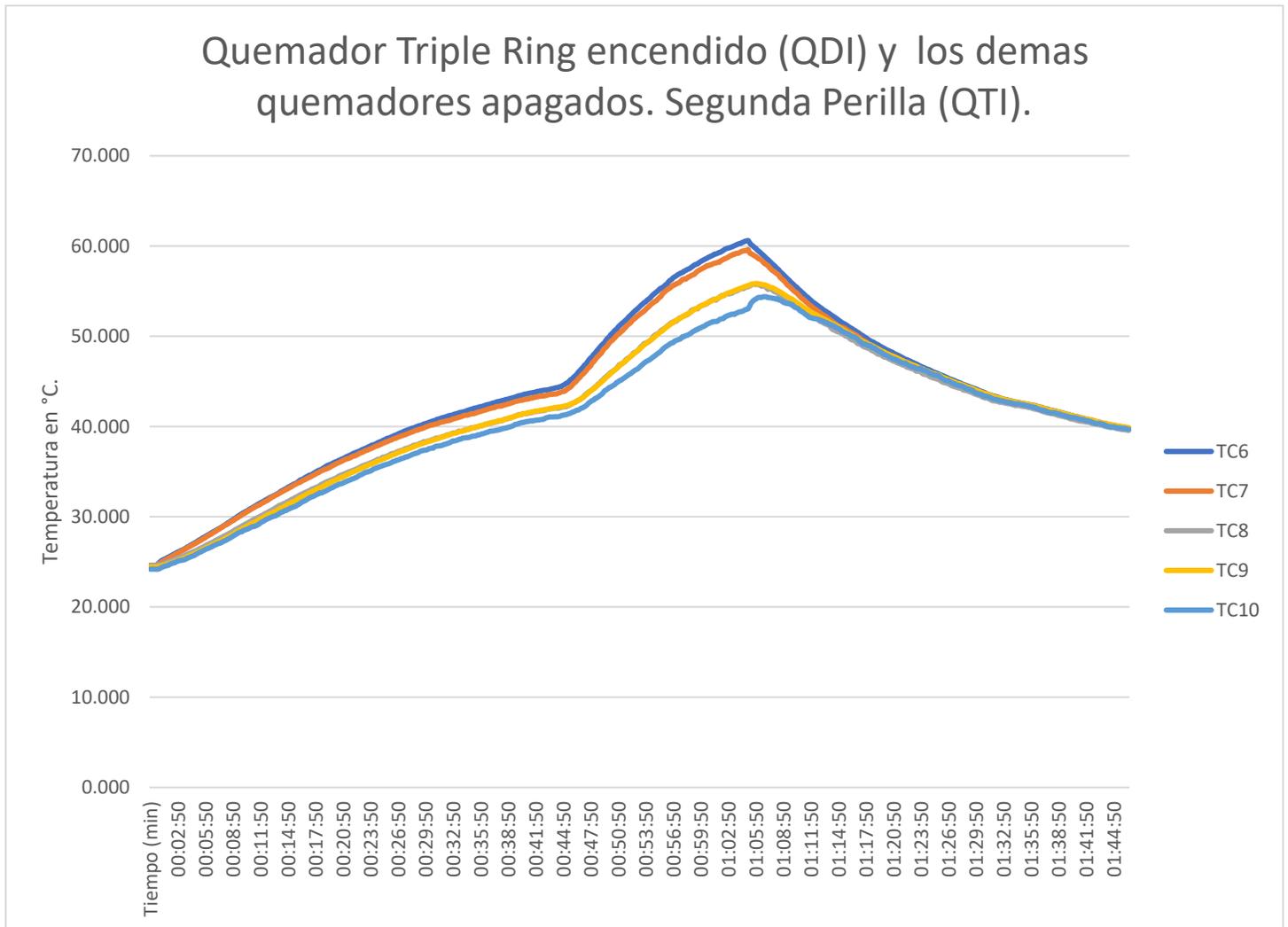


Ilustración 30. Gráfico de temperaturas, QTR encendido y los demás quemadores apagados.

Aquí se muestra que con el calor generado del QTR, la segunda perilla alcanza hasta 60 °C de temperatura.

Ya que el tener agua en el comal afecta de cierta manera el comportamiento de la curva se recopila nueva información, esta vez sin poner agua en el sartén suponiendo una condición drástica de uso.

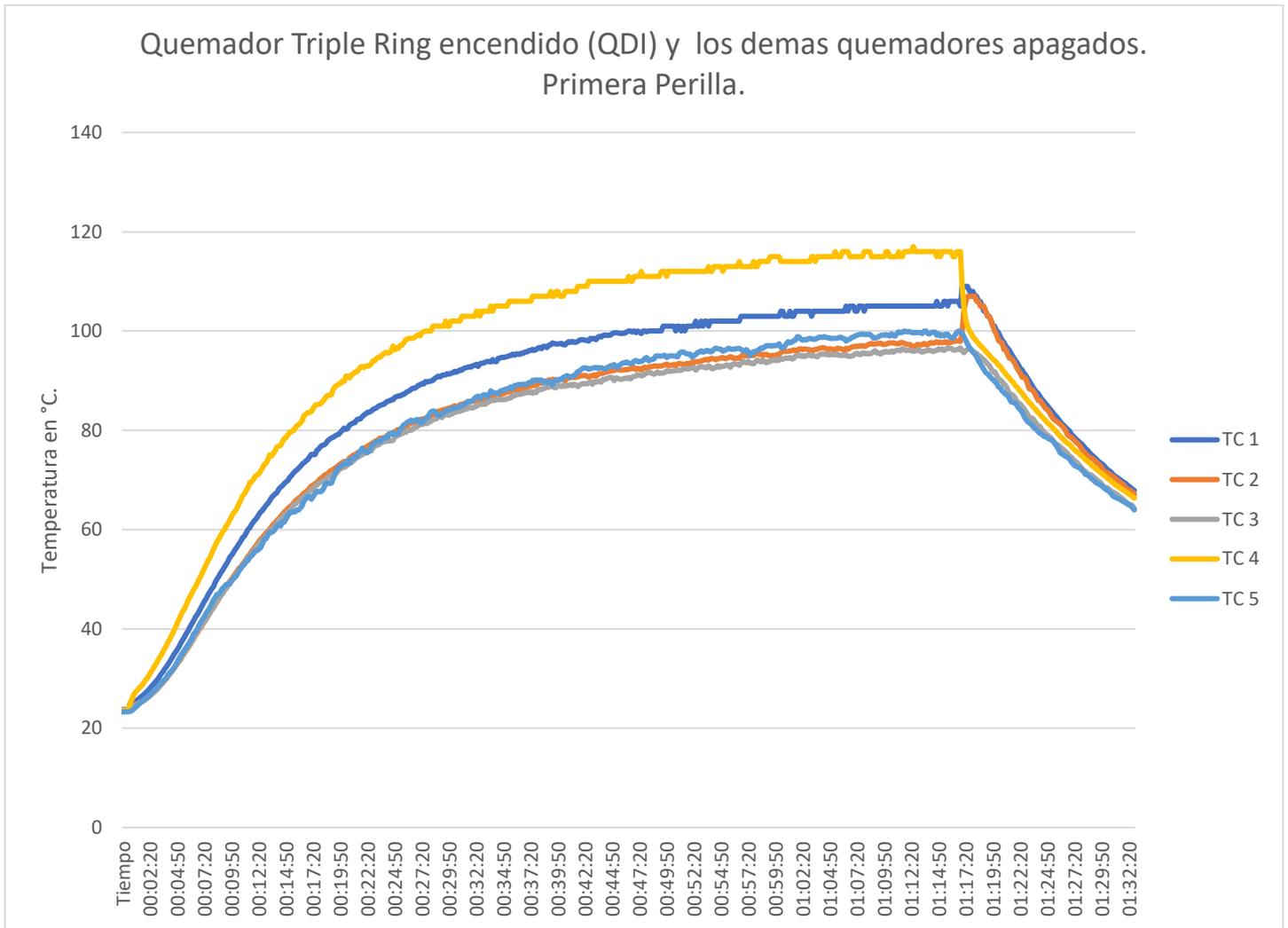


Ilustración 31. Gráfico de temperaturas, QTR encendido y los demás quemadores apagados.

La tendencia de temperatura se ve más uniforme en este grafico sin tantos picos, además ya se puede ver una estabilización de temperatura cerca de los 80 minutos, es decir el sistema ya seria estable a partir de ese momento.

Y por último se muestran los resultados para los termopares “ambientes”.

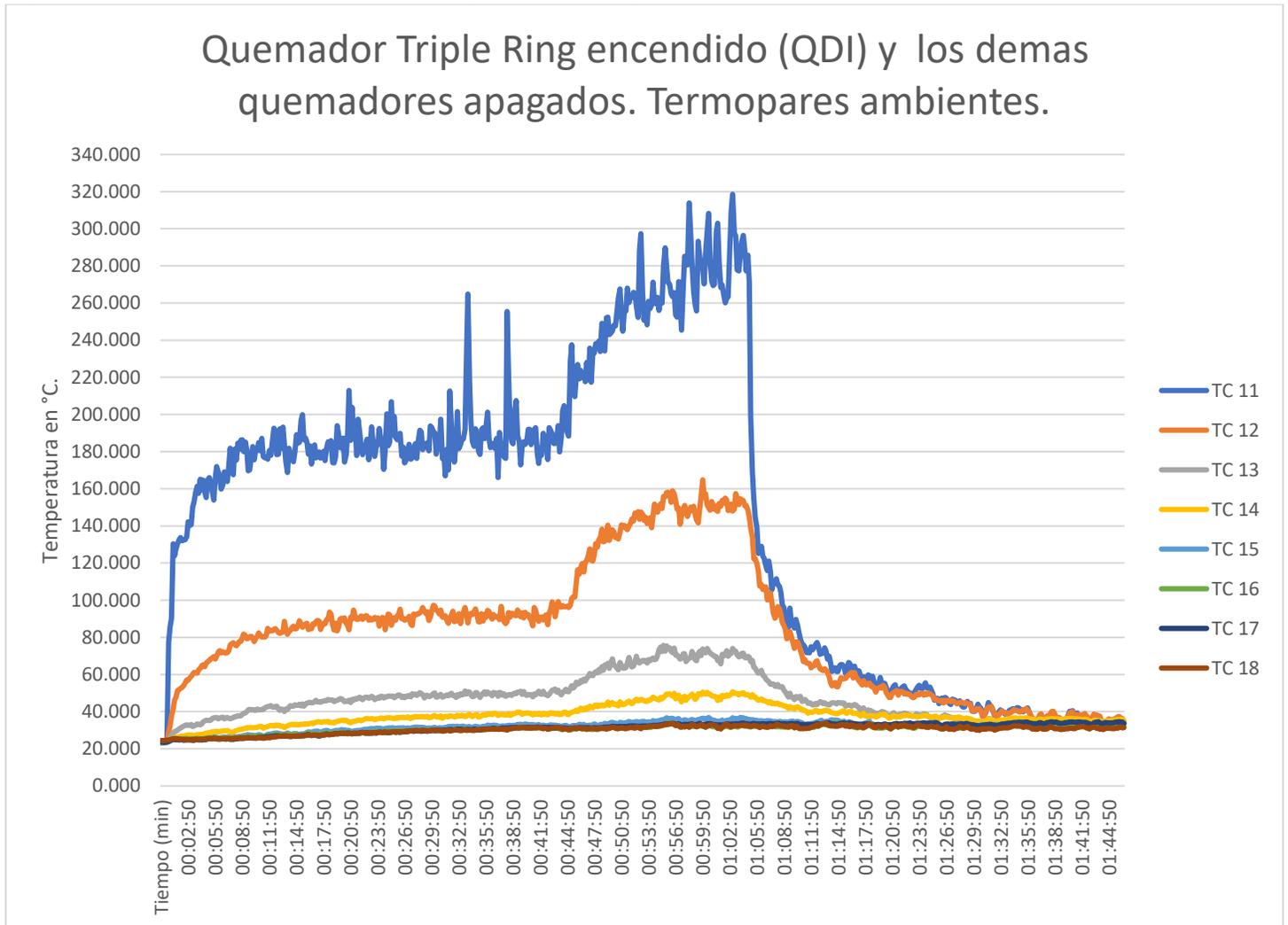


Ilustración 32. Gráfico de temperaturas, QTR encendido y los demás quemadores apagados. (termopares ambientes).

## Experimentación para obtención de emisividades.

Para la obtención de emisividad térmica de la perilla se usa el método descrito en el manual de la cámara FLIR T6XX SERIES. Se citará parte de este método para facilitar la comprensión al lector. El procedimiento se describe a continuación [25].

### 28.2.1.2. Determinación de la emisividad

Siga este procedimiento:

1. Seleccione un lugar para colocar la muestra.
2. Determine y configure la temperatura aparente reflejada de acuerdo con el procedimiento.
3. Coloque un trozo de cinta aislante con alta emisividad conocida en la muestra.
4. Calentar la muestra al menos 20 K por encima de la temperatura ambiente. La calefacción debe ser razonablemente.
5. Enfoque y ajuste automáticamente la cámara y congele la imagen.
6. Ajuste el nivel y el intervalo para obtener el mejor brillo y contraste de la imagen.
7. Establezca la emisividad en la de la cinta (normalmente 0,97).
8. Mida la temperatura de la cinta usando una de las siguientes medidas funciones:
  - Isoterma (le ayuda a determinar tanto la temperatura como la uniformidad de la muestra)
  - Spot (más simple)
  - Box Avg (bueno para superficies con emisividad variable).
9. Anote la temperatura.
10. Mueva su función de medición a la superficie de la muestra.
11. Cambie la configuración de emisividad hasta que lea la misma temperatura que su anterior medición.
12. Anote la emisividad.

Otra forma de obtener la emisividad es descrita en el documento Optris de Principios fundamentales de la medición de la temperatura, y lo describe de la siguiente manera: [26].

Método 1: Con un termopar: Con un termo sensor con contacto se determina, al mismo tiempo que se mide la radiación, la temperatura verdadera de la superficie en un punto. Después se ajusta la emisividad de modo que la temperatura medida por el dispositivo de medición infrarroja coincida con el valor medido por el termopar. El termo sensor con contacto requiere un buen contacto térmico y una disipación reducida de calor.

Para el ensayo se aprovecha la instrumentación que se realizó anteriormente, y se usa la cámara termográfica como medio para la obtención de esta emisividad. Esta emisividad fue medida por medio de una cámara FLIR T640.



Ilustración 33. Cámara FLIR T640.

Esta emisividad es comparada entre la temperatura de la perilla que está siendo medida por un termopar y la emisividad que se va variando en la cámara para obtener la misma temperatura que se observa en el termopar de la perilla, una vez que se ha logrado igualar la temperatura de la medición tomada por la cámara y el termopar, entonces se guarda la lectura de la emisividad.

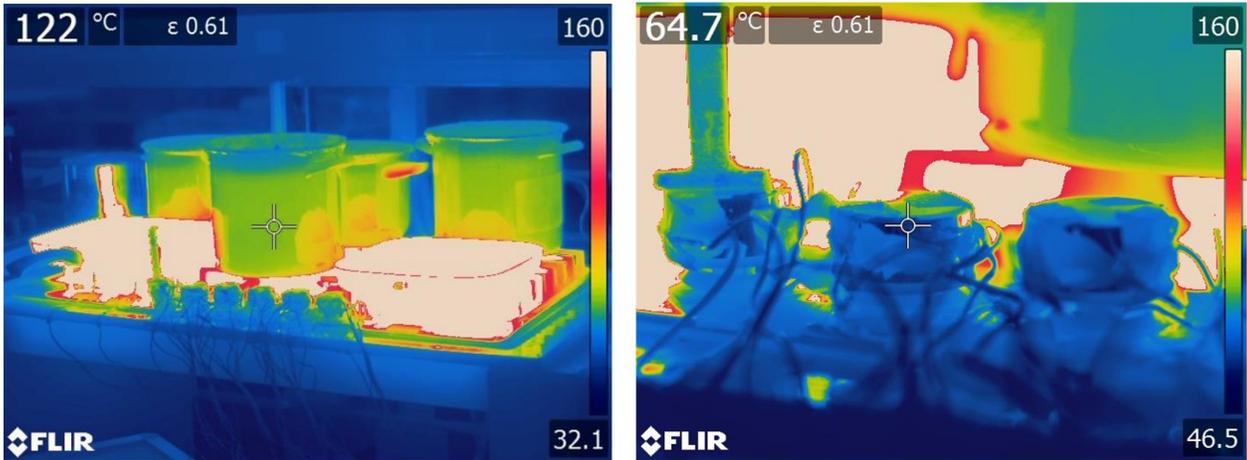


Ilustración 34. Termografía- emisividad de perilla.

Este experimento fue sencillo ya que solo se ajustó la emisividad de acuerdo con el valor verdadero de temperatura que fue registrada en el termopar.

La emisividad térmica medida fue de  $\epsilon = 0.61$  donde la temperatura era de 64.7. °C medida en el termopar.

## Medición de radiación térmica en quemadores de gas.

Para la medición de la radiación térmica se utilizará el aparato “RADCON HEAT” FLUX SENSOR, que es un sensor que permitirá obtener las mediciones de radiación y convección. Tiene un sensor negro para flujo de calor total de radiación, un sensor dorado para flujo de calor convectivo, el termopar que sobresale del sensor mide la temperatura ambiente. Tiene termopares tipo “K” y una precisión dentro de los +/-10 % del flujo de calor total [27].



Ilustración 35. Sensor de radiación y convección RADCON.

Para el procedimiento para obtener la radiación y convección térmica fue bastante complicado, el sensor ocupa bastante espacio y los cables internos están compuestos por varias ramas y de esas ramas varios hilos bastante delgados y complicados al manejo, así como la colocación del sensor en la parrilla, ya que habría que acomodarlo de tal manera que los sensores negro y dorado coincidieran con el ángulo de visión que provenía del quemador. Para tomar la lectura el sensor también ocupa que se refrigere por medio de agua, por lo que tiene una entrada por la cual circula agua y una salida por la que sale, el suministro de agua debe ser aplicado por medio de una bomba de agua para peceras.

Una vez puesto el sensor en su lugar para la toma de medición, con todas las conexiones establecidas, los cables se conectarán a extensiones de cables para multímetros, los datos serán recolectados por un analizador de datos HYDRA Sistema de obtención de datos/multímetro digital 2638A Hydra Series III, el cual hará la recopilación de datos durante toda la medición.

Paso 1.- Establecer cuáles son las conexiones para la toma de radiación y conectar los hilos a cables de multímetro, (uno positivo y otro negativo).

Paso 2.- Establecer cuáles son las conexiones para la toma de convección y conectar los hilos a cables de multímetro, (uno positivo y otro negativo).

Paso 3.- Hacer la conexión con mangueras de ¼ de pulgada de resistencia a temperatura para refrigerar el sensor con agua.

Paso 4- Hacer la conexión de bomba de agua para pecera con las mangueras de ¼ de pulgada.

Paso 5.- Colocar el sensor en la posición que se desea medir la radiación y convección.

Paso 6.- Colocar el suministro de agua para refrigerar el sensor.

Paso 7.- Conectar cables de multímetro a analizador de datos Hydra.

Paso 8.- Hacer una pequeña prueba de censado.

Paso 9.- Realizar la toma de mediciones.



Ilustración 36. Imagen ilustrativa ensayo de radiación y convección térmicas en quemadores a gas.

Para este ensayo a continuación se presentarán los resultados obtenidos:

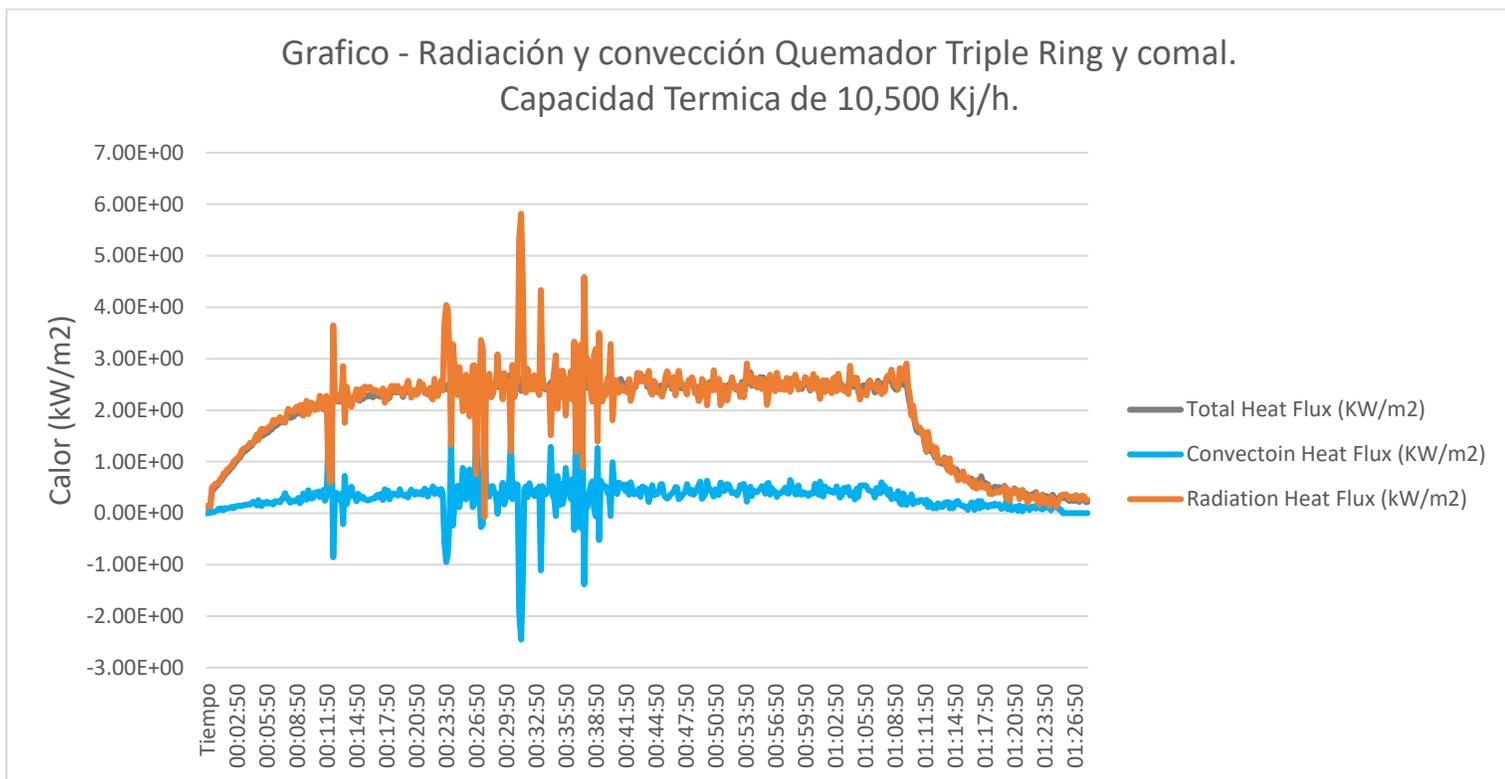


Ilustración 37. Gráfico- radiación y convección Quemador Triple Ring y comal.

La toma de estas mediciones es hecha por el sensor y son recopiladas en mili voltaje, en el manual del sensor dan la memoria de cálculo para obtener la equivalencia de milivolts a flujo de calor por unidad de área. [27]

Sin embargo, lo primero que hay que hacer es pasar ese valor de mili voltaje a voltaje, y una vez obtenido el valor de voltaje entonces se procede con los cálculos especificados en la memoria de cálculo.

Sensor Negro:  $\Phi_{Total}$ .

Sensor Dorado:  $\Phi_{Convección}$ .

$$\Phi_{Radiación} = \left( \Phi_{Total} - \Phi_{Convección} / 0.83 \right)$$

Ecuación 7. Radiación de calor por unidad de área [27].

$$Total\ Heat\ Flux \left( \frac{kW}{m^2} \right) = Total\ Voltaje\ (mv) / 2.84$$

Ecuación 8. Flujo total de calor [27]

De esta manera se ha generado la gráfica mostrada. Como se puede ver en el gráfico al principio cuando el quemador se enciende dígame desde el minuto 0, la curva de radiación tiende a crecer pero alcanza una rápida estabilización cerca del minuto 16, aunque hay bastantes picos en ambos gráficos, tanto como en la radiación y la convección, esto se debe a las ventiscas de aire que han sucedido durante el experimento, también se puede apreciar que los gráficos es como si fueran un tipo de espejos, aunque la convección pareciera tener un valor promedio de  $417\ W/m^2$  y la radiación un valor promedio cerca de los  $2560\ W/m^2$ .

Si estas mediciones de flujo de calor por unidad de área fueran comparadas con las gráficas de temperaturas en las perillas, se podrá apreciar que, aunque el flujo de calor pareciera después de los 16 minutos estar en un estado estacionario en comparación con la curva de temperatura que no parece alcanzar una estabilización, sino hasta después de la 90 o 100 minutos. Dicho de otra manera, aunque el quemador emita la misma energía por unidad de área, la temperatura en la perilla sigue creciendo, sigue absorbiendo la energía proporcionada por el quemador.

También se realizó una medición para medir la radiación y convección de un quemador jumbo, donde se colocó sobre la parrilla de este quemador un comal, como el que se usó para el quemador triple ring.

Los resultados obtenidos en esta medición se presentan a continuación en el gráfico.

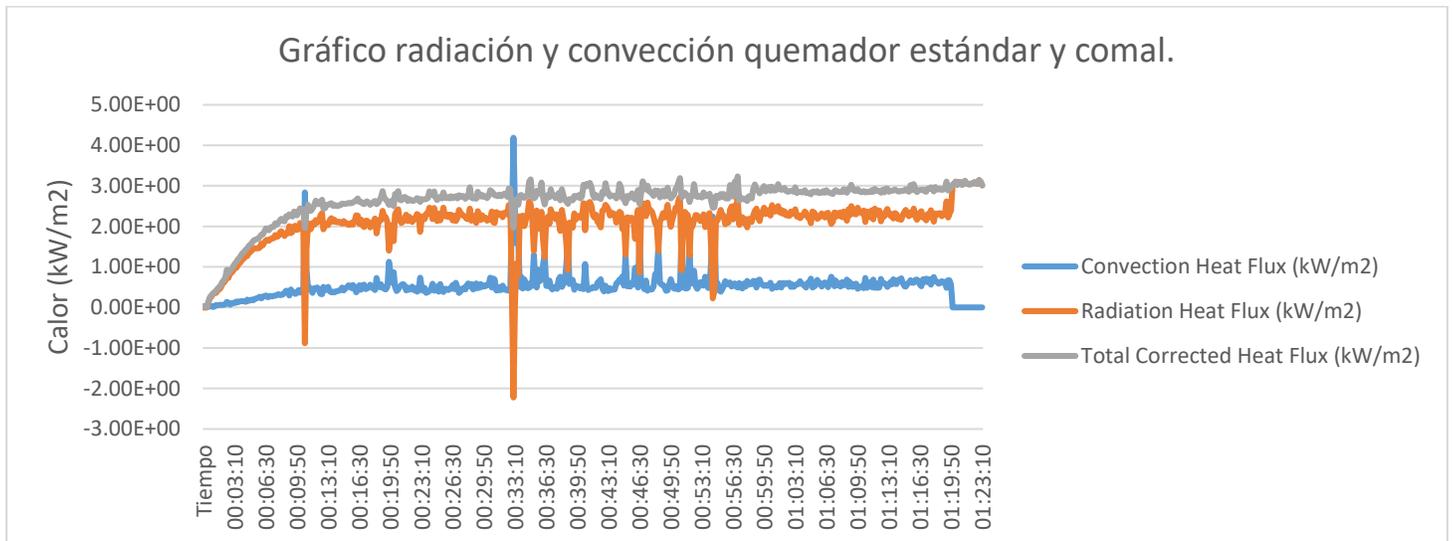


Ilustración 38. Gráfico radiación y convección quemador estándar y comal.

Como se puede apreciar en esta grafica la radiación para este quemador es mayor que la que se generó con el quemador triple ring, esto fue debido a que en la realización del experimento la cercanía del quemador estándar, el comal se encontraba más cerca del sensor, que en comparación del quemador triple ring se encontraba más lejos, la distancia nominal tangencial del comal a la perilla es de 2 cm, en la experimentación esta se redujo 0.5 cm , es decir estaba a 1.5 cm de separación, es de esto genero un aumento de calor total cerca de 500 W/m<sup>2</sup>.

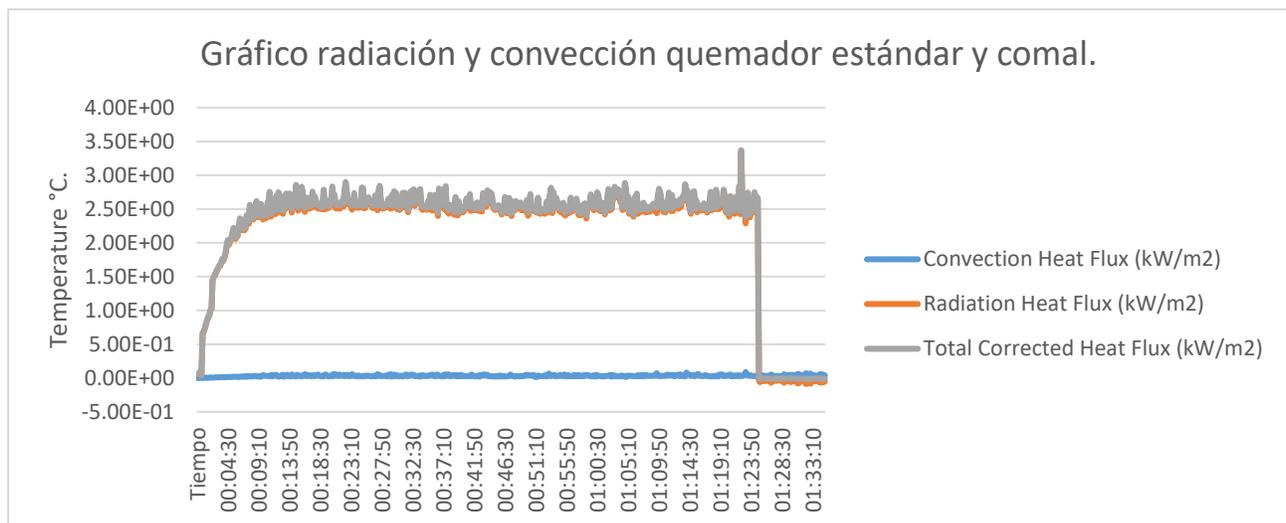


Ilustración 39. Medición de radiación quemador estándar, comal y perilla a distancia nominal.

Este grafico muestra cómo es que la distancia entre el comal y la perilla afecta directamente a la radiación medida e implícitamente a la temperatura que se genera en la perilla.

### Medición de capacidad térmica de un quemador a gas.

Para la medición de capacidad térmica de un quemador a gas se utilizó el procedimiento de la norma, “Aparatos domésticos para cocinar alimentos que utilizan Gas L.P. o Gas Natural. Especificaciones y métodos de prueba.” [24].

El cual describe a través de su procedimiento que instrumentos de medición se deben usar y cuál es el proceso que se debe seguir. Este procedimiento indica que hay que conectar el aparato al suministro principal de gas, encender el quemador por 5 minutos, como modo de precalentamiento, y una vez acabado este periodo, medir el consumo de gas que se generara en un lapso de 6 minutos.

En este caso se midió el flujo de gas consumido en pies cúbicos por medio de un medidor de flujo “wet” y se utilizó la presión de alimentación correspondiente a gas propano o L.P.

Condiciones de prueba	Presión	Gas Natural (kPa)	Gas L.P. (kPa)
1	Normal	1.76	2.75
2	Baja	1.26	1.99
3	Alta	2.16	2.99

Tolerancia:  $\pm 0.025$  kPa

Tabla 2.Presiones de prueba.

Esta medición de flujo de gas fue capturada y convertida a metros cúbicos, dando un resultado de medición de  $V = 0.012532 \text{ m}^3$ .

## Capítulo 4. Análisis (Primer caso base de simulación).

---

En este capítulo se abarcarán las técnicas de análisis y estudio de los fenómenos, todo el proyecto se estará dividiendo en pequeñas partes, donde recae un análisis diferente con el fin de ir haciendo el fenómeno más simple, entendiendo su naturaleza, sus características, su estado y los factores que intervienen, así como el estudio para darle solución a cada fenómeno. La mayor parte del análisis se deriva de los ensayos de laboratorio y las mediciones que se lograron recopilar, así como de las simulaciones numéricas CFD que se tuvieron que hacer.

## Cálculo de Capacidad térmica de un quemador a gas.

El cálculo de capacidad térmica de un quemador se vuelve fundamental en este proyecto, ya que es una entrada para el sistema, una entrada de calor, el quemador en la parrilla de empotrar es una fuente de energía que mientras se mantenga encendido estará liberando calor derivado de las reacciones químicas, comúnmente conocido como calor de combustión.

Este calor de combustión afecta directamente a la perilla, ya que al hacer combustión se genera una flama la cual desprende luz y calor, que estará calentando a todo el sistema, saber cuál es el valor de esta capacidad es imperativo para poder incluir este valor en los modelos de simulación.

La capacidad térmica de un quemador está definida por la Norma Mexica (NOM-010) de la siguiente manera: Capacidad térmica nominal: Cantidad de energía calorífica que genera un quemador de gas en determinado tiempo, usualmente expresado en kJ/h [24].

La capacidad térmica nominal se comprueba con la expresión siguiente [24].

$$CT = V_0 PC \quad \text{kJ/h} \quad [24]$$

Ecuación 9.Capacidad térmica de un Quemador a Gas.

En donde

$V_0$  es el flujo volumétrico de gas seco que se pudo haber obtenido bajo las condiciones de referencia, en  $m^3/h$ , bajo las mismas condiciones [24].

$V$  es el flujo volumétrico que se obtiene y se expresa, bajo condiciones de prueba, en  $m^3/h$  [24].

$P_a$  es la presión atmosférica en  $kPa$  (101.33) [24].

$P$  es la presión de suministro de gas en  $kPa$  [24].

$t_g$  es la temperatura de gas en el punto de medición en  $^{\circ}C$  [24].

$d$  es la densidad relativa del gas utilizado, seco o húmedo, relativo al aire seco [24].

$d_r$  es la densidad relativa del gas de referencia seco, relativo al aire seco (1.55) [24].

$PC$  es el poder calorífico del gas (el gas propano tiene un valor de 95 000  $\text{kJ}/m^3$ ) [24].

El flujo volumétrico  $V_0$  se obtiene mediante la fórmula siguiente:

$$V_0 = V \sqrt{\frac{101.33 + P}{101.33} * \frac{P_a + P}{101.33} * \frac{288.15}{273.15 + t_g} * \frac{d}{d_r}}$$

Ecuación 10.Flujo volumétrico de gas.

La fórmula anterior aplica cuando el gas que se utiliza es seco (metano). Si se utiliza un medidor húmedo o si se utiliza gas saturado de humedad (propano), el valor “d” (densidad relativa del gas utilizado, relativo al aire seco) debe sustituirse por la densidad del gas húmedo “ $d_h$ ” que se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$d_h = \frac{(P_a + P - P_w) d + 0.622 P_w}{P_a + P}$$

Ecuación 11. Densidad de Gas húmedo.

En donde:

$P_w$  es la presión de vapor de agua (que se expresa en kPa) a la temperatura del gas ( $t_g$ ).

La presión de saturación de vapor ( $P_w$ ), a la temperatura del gas ( $t_g$ ), puede determinarse con la siguiente expresión matemática:

$$P_w = \frac{e^{21.094 - \frac{5262}{273.15 + t_g}}}{10}$$

Ecuación 12. Presión de vapor de agua.

e es el número adimensional de Euler con un valor de 2,71828183

En la medición del flujo volumétrico hecho en el capítulo de medición, se obtuvo un valor de  $0.012532 \text{ m}^3/\text{h}$ . Para obtener el flujo volumétrico de gas seco primero se calculará el valor de  $P_w$ . Para facilidad del cálculo se utiliza una hoja Excel.

$$P_w = \frac{e^{21.094 - \frac{5262}{273.15 + 24.9}}}{10} = 3.11633924355093 \text{ kPa}$$

$$d_h = \frac{(82.01 + 2.75 - 3.11633) 1.55 + 0.622 (3.11633)}{82.01 + 2.75} = 1.515880571$$

$$V_0 = 0.012532 \text{ m}^3/\text{h} \sqrt{\frac{101.33 + 2.75}{101.33} * \frac{82.01 + 2.75}{101.33} * \frac{288.15}{273.15 + 24.9} * \frac{1.515880571}{1.55}} = 0.0112951720991503 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$CT = \left( 0.0112951720991503 \text{ m}^3/\text{h} \right) * \left( 95\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) = 10730.4134941928 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \quad [24]$$

Este cálculo de capacidad térmica indica la cantidad de energía que está liberando el quemador en una hora 10,730.41 kJ/h, ahora el quemador al liberar esta energía en forma de flama inmediatamente empieza a perder energía en forma de calor y de acuerdo con la ley de enfriamiento de Newton.

## Análisis y Procesamiento de Simulación CFD

Ya se habló un poco del caso base que se plantea resolver, pero en este apartado se hablara detalladamente de cada paso aplicando las diferentes metodologías, para la solución de este proyecto, y como a través de estas metodologías y los diferentes modelos llevaremos el caso a la solución numérica utilizando el método de volúmenes finitos a través del software ANSYS para obtener las predicciones numéricas de los fenómenos de transferencia de calor.

Definición de objetivos que se desean resolver.

Lo que se desea saber es la temperatura de estado estacionario de las perillas, esta es una reacción de haber encendido los quemadores de la parrilla por un tiempo determinado. Entonces se necesita conocer es la distribución de temperatura en la perilla.

### Generación de Modelo CAD.

Definir la geometría a analizar. Esta geometría de ensamble principal se reducirá con el fin de ahorrar tiempo computacional y complejidad. Este ensamble fue en hecho en software de PTC "Creo Parametric versión 7.0".

Reducción de geometría de comal; sin bordes, sin mango, sin redondeos.

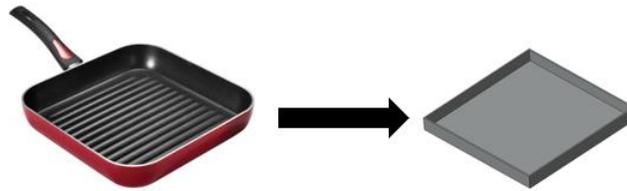


Ilustración 40. Reducción de geometría de comal.

Reducción de geometría de ensamble de perilla de 3 piezas; se eliminan redondeos, se eliminan "snaps" de ensamble, se eliminan tornillos, se eliminan ángulos de desmoldeo.

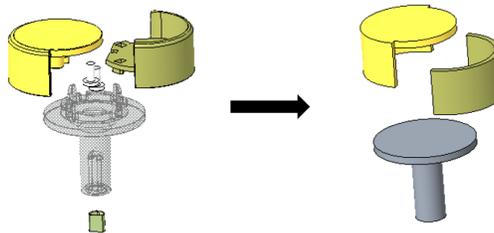


Ilustración 41. Reducción de geometría de ensamble perilla 3 piezas.

Reducción de geometría de parrilla de fundición, se eliminan redondeos, se eliminan ángulos de desmoldeo, se eliminan geometrías no importantes para el análisis, como son las canaletas estructurales sobre dedos de parrilla.

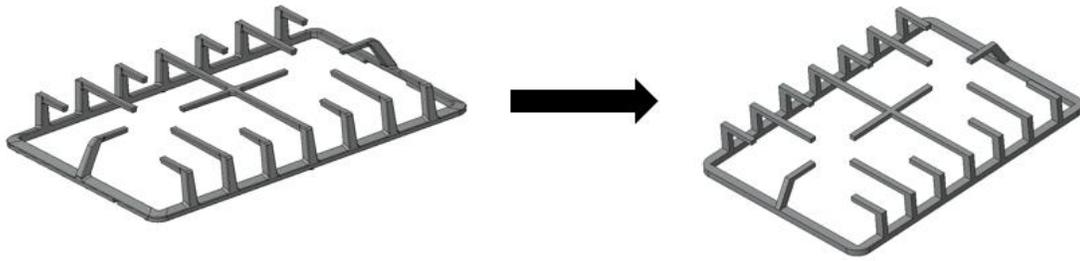


Ilustración 42.Reducción de geometría en parrilla de fundición.

Reducción de geometría en cubierta; se eliminan barrenos sobre cubierta, se eliminan geometrías innecesarias para el análisis como son los topes de parrillas, barrenos de sensor de flama y algunos formadores de cubierta.

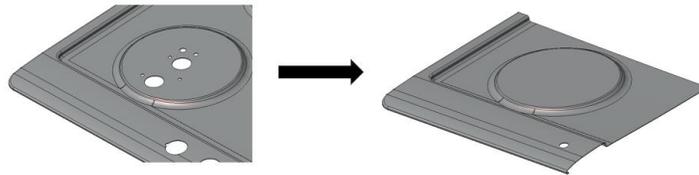


Ilustración 43.Reducción de geometría de cubierta.

Reducción de geometría de tapas de quemador; se eliminan redondeos, se elimina serigrafía de fundición, se eliminan chaflanes.

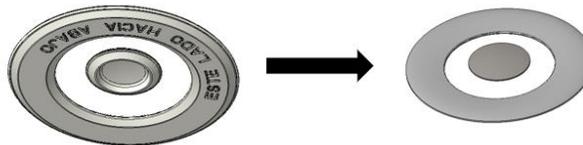


Ilustración 44.Reducción de geometría de tapas de quemador.

Reducción de geometría de quemador triple ring; se eliminan redondeos, ángulos de desmoldeo, barrenos innecesarios, y portas de quemador, Venturi y mamelones.

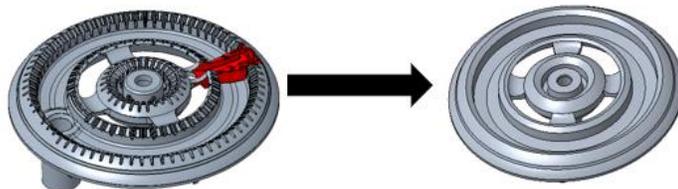


Ilustración 45.Reducción de geometría de quemador.

Reducción a ensamble Principal de parrilla. Como este ensamble fue hecho con la metodología TDD (top Down Desing), la reducción de geometría a cada una de las partes, afecto directamente al ensamble principal, por lo cual el modelo quedo como se muestra en la siguiente imagen.

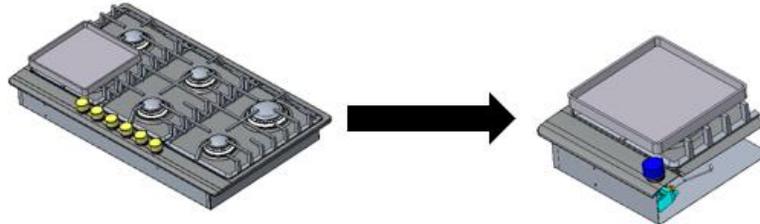


Ilustración 46.Reducción de ensamble principal.

## Creación de la malla computacional.

Para la creación de la malla computacional se ocupará el software de ANSYS llamado “Desing Modeler” que está dentro de los módulos de “workbench”.

Se importará la geometría desde el software “creo parametric” en formato “. STEP”, sin embargo, antes de importar la geometría reducida, fue necesario crear un “dominio”, el cual se colocó en el ensamble principal antes de importar la geometría.



Ilustración 47.Dominio del sistema.

Importar la geometría a “Desing Modeler” y nombrar todas las superficies con “named selección” dará la oportunidad de identificar las partes en el módulo de “configuración”. Una vez identificadas todas las superficies se creará una operación de “booleano” a la geometría, para extraer del dominio cada pieza y conservar solo las cavidades de pieza dentro del dominio.

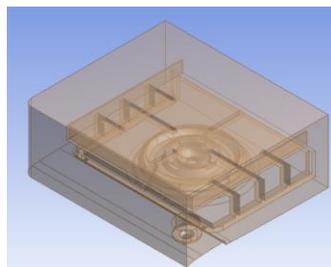


Ilustración 48.Generación Booleano de ensamble.

El método de mallado se colocó como automático, aunque después se pretende correr con el de tetraedros, el tamaño de elemento se dejó en 2 mm, y se dejó como física de preferencia CFX, al igual que el solucionador de preferencia CFX. Con estas indicaciones el número de nodos fueron 1119825, y el número de elementos 5876197.

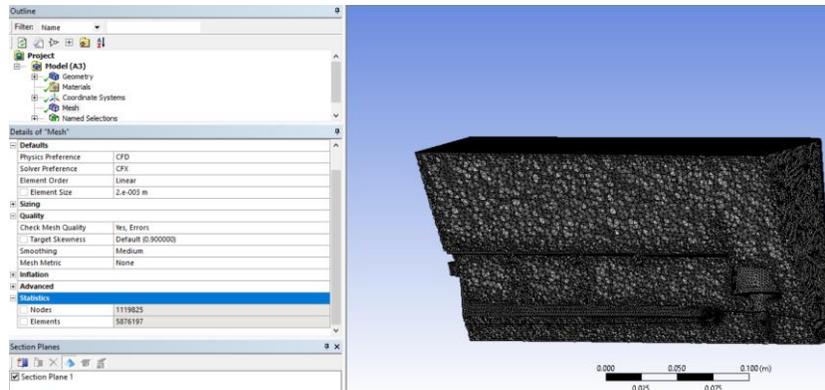


Ilustración 49. Malla computacional del ensamble.

Esta imagen representa el mallado computacional que se generó mostrando una sección transversal de la malla, así como el cuadro de información, que muestra el número de elementos y nodos que se formaron en la malla.

## Configuración de la Simulación.

Para la configuración de la simulación se utiliza el solucionador de ANSYS, CFX, donde se configura el modelo de la siguiente manera y se indican las condiciones de frontera utilizadas para el caso expresadas como en el Configurador de CFX;

Para las piezas.

Parrilla → Wall con una emisividad de 1

Cubierta → Wall con una emisividad de 0.33

Quemador y tapas → Wall con una emisividad de 1 además en el quemador se agrega el calor producido  $2.9 \text{ kW/m}^2$ .

Ensamble Perilla → Wall con una emisividad de 0.61

Sartén → Wall con una emisividad de 1

Para el dominio aire → Opening con una temperatura de  $30^\circ\text{C}$

Para el dominio → Se selecciona un dominio de fluido y como gas ideal Aire, con una flotación de  $-9.81 \text{ m/s}^2$ , se selecciona el uso de ecuación de energía "thermal Entergy" con radiación y el método S2S.

Se muestra a continuación una imagen de la configuración de la simulación.

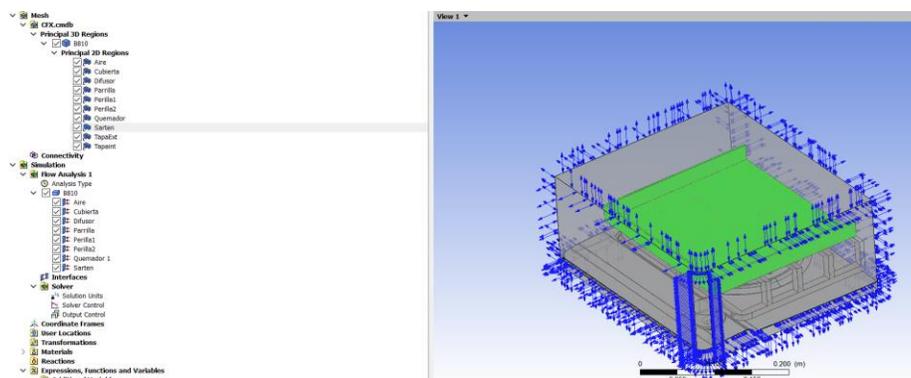


Ilustración 50. Configuración de la simulación.

Esta imagen muestra la configuración de la simulación, así como la asignación de cada una de las partes del ensamble y su correlación de entrada (Wall, Opening, Inlet, etc.).

Para esta simulación se ocupó el Método de transferencia de calor “Total Energy” con un modelo de turbulencia “k-Épsilon” y con un método de radiación térmica “Transferencia discreta” y modo de transferencia “Superficie a Superficie” S2S, estas condiciones de cálculo se especifican según los manuales de ANSYS CFX de la siguiente manera.

## Transporte de radiación.

El objetivo del modelado de radiación es resolver la ecuación de transporte de radiación, obtener el término fuente,  $S$ , para la ecuación de energía, y el flujo de calor radiativo en paredes, entre otras cantidades de interés. Debe limitarse a procesos de radiación coherentes e independientes del tiempo. Esto normalmente es muy buena aproximación de situaciones que probablemente se encontrarán en aplicaciones industriales porque la escala de tiempo para que la radiación alcance el equilibrio local es muy corta y las temperaturas son relativamente bajas [28].

La ecuación de transferencia de radiación espectral (RTE) se puede escribir como [28]:

$$\frac{dI_v(r, s)}{ds} = \{-(K_{av} + K_{sv}) I_v(r, s) + K_{av} I_v(v, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} dI_v(r, s')\}$$

Ecuación 13. Ecuación de transporte radiativa.

donde:

- $\nu$  = frecuencia.
  - $r$  = posición de vector.
  - $s$  = dirección de vector.
  - $s$  = longitud de trayectoria.
  - $K_a$  = coeficiente de absorción.
  - $K_s$  = coeficiente de dispersión.
  - $I_b$  = intensidad de emisión de cuerpo negro.
- 
- $I_\nu$  = intensidad de radiación espectral que depende de la posición ( $r$ ) y la dirección ( $s$ ).
  - $T$  = temperatura absoluta local.
  - $\Omega$  = Angulo sólido.
  - $\Phi$  = función de fase de dispersión.
  - $S$  = término de fuente de intensidad de radiación.

## Temperatura Total.

La temperatura total se deriva del concepto de entalpía total y se calcula exactamente igual manera como la temperatura estática, excepto que la entalpía total se utiliza en las relaciones de propiedad [28].

## Transferencia Discreta en CFX

La implementación del modelo de Transferencia Discreta en CFX asume que la dispersión es isotrópica; por lo tanto, la ecuación 8-1 (p. 351) se puede simplificar como [28]:

$$\frac{dI_v(r, s)}{ds} = \{-(K_{av} + K_{sv}) I_v(r, s) + K_{av} I_v(v, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} I_v(r, s') d\Omega' + S$$

Ecuación 14. Simplificación de ecuación RTE [28].

Suponiendo que el sistema es razonablemente homogéneo, de modo que:

$$I_v(r, s) \sim I_v(r + d_r) \quad q_v^R(r) \sim q_v^R(r + d_r)$$

Ecuación 15. RTE sistema homogéneo [28].

el enfoque es entonces resolver para la intensidad,  $I_v$ , a lo largo de los rayos que parten de los límites usando la ecuación de transferencia:

$$I_v(r, s) = I_{v0} \exp(-(K_{av} + K_{sv})s) + I_{bv} (1 - \exp(-K_a s)) + K_{sv} \bar{I}_v$$

Ecuación 16. Intensidad  $I_v$  [28].

Donde

$$I_{v0} = \text{Intensidad de radiación que sale del límite.}$$

$$I_v = \text{Intensidad de radiación media.}$$

Entonces, se integra  $I$  sobre ángulo sólido en puntos discretos para obtener la radiación incidente espectral,  $G$  y el flujo de calor radiativo,  $q_r$ , y se usa la suposición de homogeneidad para extender la solución a todo el dominio. No linealidades en el sistema debido a dispersión, reflexión difusa o dependencia de la temperatura de la radiación cantidades se supera por iteración [28].

Debido a que el objetivo del modelado de radiación térmica es obtener la absorción volumétrica total y emisión, todavía se necesitan cálculos adicionales. Para el modelo espectral de Gray, el cálculo se realiza una vez para un campo de intensidad de radiación único. Para la Suma Multibanda y Ponderada de Gases Grises, la debe calcularse la solución para cada banda espectral/gas gris y una integración final para obtener el total. Se requieren cantidades de radiación. Bajo el supuesto de un campo de radiación coherente, es decir, la solución en un frecuencia dada es independiente de la de todas las demás frecuencias [28].

## Cálculo de la solución.

Para el cálculo de la solución se toma en cuenta los recursos computacionales con los que se disponen, en este caso se calculara con una computadora HP ZBOOK FURY G7 la cual tiene 6 núcleos y 12 procesadores lógicos.

System Manufacturer	HP
System Model	HP ZBook Fury 15 G7 Mobile Workstation
System Type	x64-based PC
System SKU	320F6LS#ABM
Processor	Intel(R) Core(TM) i7-10850H CPU @ 2.70GHz, 2712 Mhz, 6 Core(s), 12 Logical Processor(s)

Ilustración 51. Recursos computacionales.

Esta imagen muestra los recursos computacionales con los que se cuentan.

En el administrador del solucionador se selecciona doble precisión al cálculo y 4 núcleos.

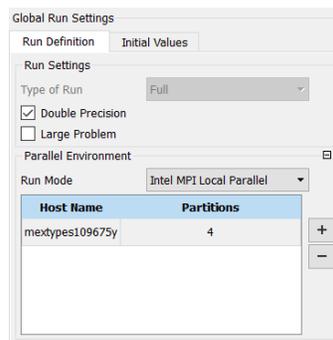


Ilustración 52. Configuración de corrida.

## Criterios para el cálculo.

Los criterios para el cálculo son los siguientes.

### Criterios de convergencia RMS.

No existe un criterio universal para evaluar la convergencia de un código de CFD. Por ello, para evaluar la convergencia durante el proceso iterativo de cálculo, se empleará una combinación de los resultados obtenidos para los residuos escalados, la convergencia de alguna magnitud de interés en un plano o un punto determinado y los balances de masa y energía globales sobre el dominio computacional, de modo que los resultados obtenidos sean suficientemente completos y fiables. A continuación, se describen de manera general premisas o condiciones que deben cumplir los parámetros anteriores para que se pueda asegurar la convergencia del código [14]:

- ❖ Residuos escalados: deben ir decreciendo con el número de iteraciones hasta alcanzar valores del orden de  $10^{-12}$  para continuidad y  $10^{-16}$  para las tres componentes del vector velocidad y la energía.
- ❖ Magnitudes fluidas: debe observarse la estabilización y convergencia de todas las magnitudes fluidas monitorizadas durante el proceso de cálculo.
- ❖ Balance de masa global: debe cumplirse con un error del orden de  $10^{-16}$  kg/s al final del proceso iterativo.
- ❖ Balance de energía global: debe cumplirse con un error del orden de  $10^{-4}$  W para el problema térmico (valor suficientemente pequeño respecto a los valores de los flujos de calor y energías que aparecen en este problema) y un error del orden de  $10^{-8}$  W para el problema fluidodinámico.

## Residuales.

Los residuos son una de las herramientas más importantes a la hora de controlar la convergencia durante el proceso iterativo. Éstos, de modo general, representan la diferencia entre los valores de las variables a resolver entre dos iteraciones. Si un código converge, estas diferencias tienden a reducirse hasta alcanzar un valor muy pequeño en el que se estabilizan. En un caso ideal, debería hacerse cero, pero los ordenadores tienen precisión finita, por lo que se puede conseguir que los residuos se estabilicen en torno a seis órdenes de magnitud respecto a los valores iniciales  $10^{-6}$  (precisión simple) o incluso valores próximos a los doce órdenes de magnitud  $10^{-12}$  (precisión doble), pero nunca se conseguirán que se hagan cero [14].

En este caso se elegirá un objetivo de residual de  $10^{-4}$ .

A continuación, se presenta algunas imágenes de estos criterios de cálculo y los residuales de convergencia.

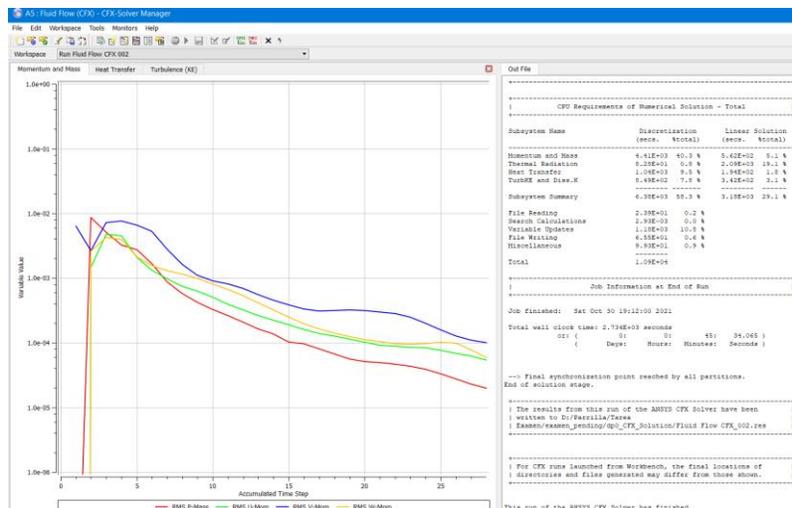


Ilustración 53. Convergencia de experimentación.

Esta imagen muestra el criterio de convergencia para las ecuaciones de balance momentum y masa  $10^{-4}$ . Los gráficos muestran un comportamiento “normal” y de tendencia hacia la convergencia.

La siguiente imagen muestra la convergencia para la ecuación de transferencia de calor.

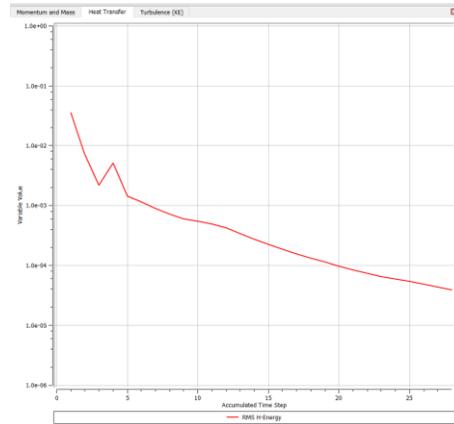


Ilustración 54. Convergencia para transferencia de calor.

Este gráfico muestra un comportamiento “normal” y de tendencia hacia la convergencia  $10^{-4}$ .

El siguiente gráfico muestra la convergencia para las ecuaciones de turbulencia.

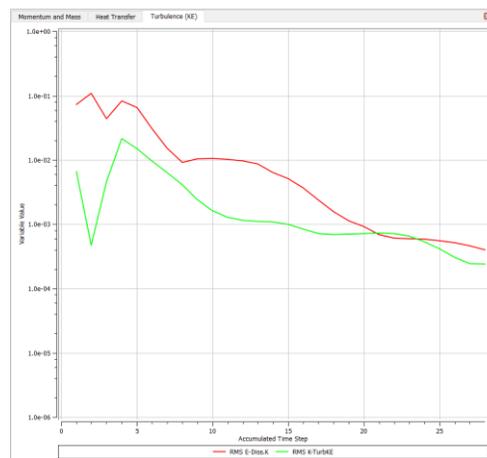


Ilustración 55. Convergencia para ecuaciones de turbulencia.

Este gráfico muestra un comportamiento “normal” y de tendencia hacia la convergencia  $10^{-4}$ .

## Análisis de los resultados del primer caso base.

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos de la simulación y se estarán comparando con los resultados obtenidos en la experimentación.

El tiempo de simulación fue el siguiente.

```
+-----+
|                               Job Information at End of Run                               |
+-----+

Job finished:   Sat Oct 30 19:12:00 2021

Total wall clock time: 2.734E+03 seconds
                   or: (           0:           0:           45:           34.065 )
                   (           Days:           Hours:           Minutes:           Seconds )

--> Final synchronization point reached by all partitions.
End of solution stage.
```

Ilustración 56. Tiempo de simulación.

Este tiempo es aceptable para la simulación.

Para expresar los resultados obtenidos, se usarán diagramas de contorno para ver la distribución de temperatura en la perilla.

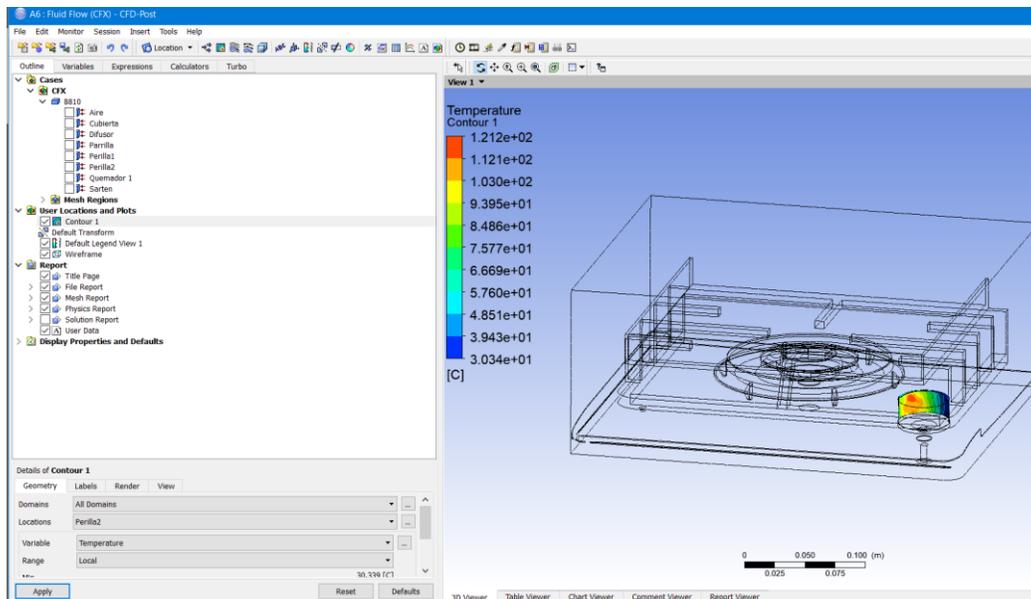


Ilustración 57. Resultados de simulación.

Esta imagen muestra los resultados que se obtuvieron en la simulación, se muestra la distribución de temperatura, el punto de mayor temperatura se indica en la colorimetría con un valor de 121°C, esto está muy bien, sin embargo, no todo el análisis es preciso, pero primero se mostrara la similitud entre la simulación y la experimentación.

Si se compara este punto de 121°C y el contorno de la perilla muy cerca de este punto se podría decir que la simulación fue bastante buena ya que empata casi a la perfección con lo experimental, se presentara a continuación ambos resultados.

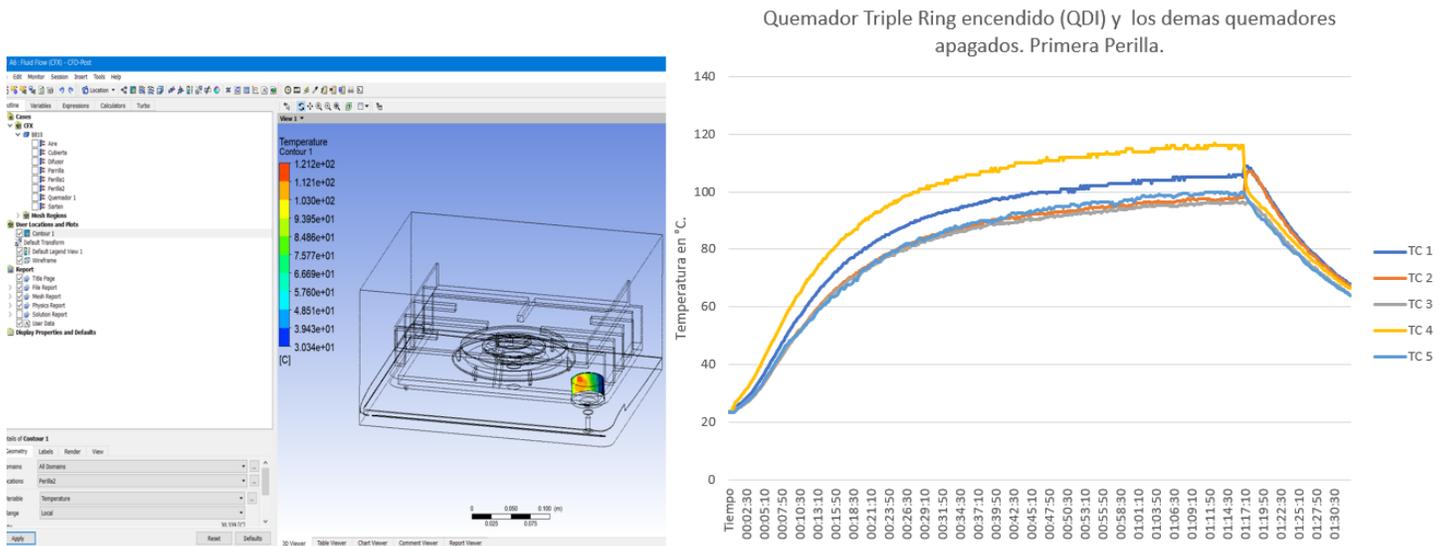
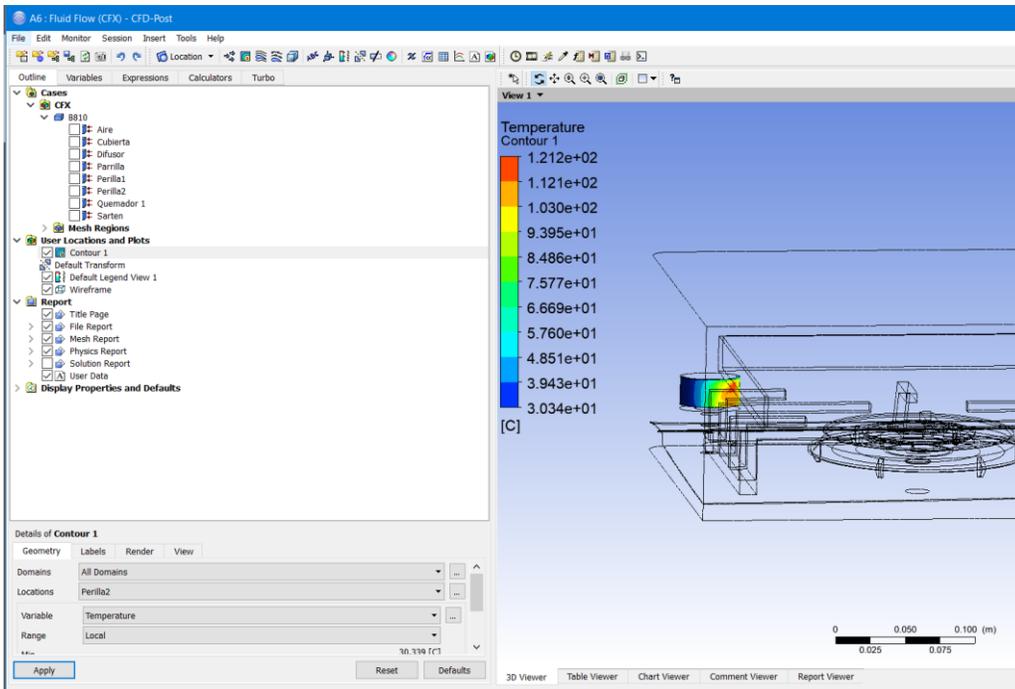


Ilustración 58. Comparación de resultados de simulación y los experimentales.

Como se puede apreciar hay muy buena correlación entre la simulación y lo experimental, la diferencia está en casi 4°C, lo experimental tiene un valor de 116°C.

Ahora se presentará una imagen de la perilla donde no incide directamente la radiación, la radiación impacta según el ángulo sólido y la propagación de las ondas electromagnéticas.



Como se parecía en esta imagen, hay temperaturas en el contorno de la perilla donde, pareciera que hay 30°C, esto es totalmente absurdo, esto en la experimentación no pasa y físicamente no es posible. En la experimentación la temperatura más baja que se registro fue de 96°C aproximadamente.

Ahora se presentará una imagen de contorno del difusor de perilla.

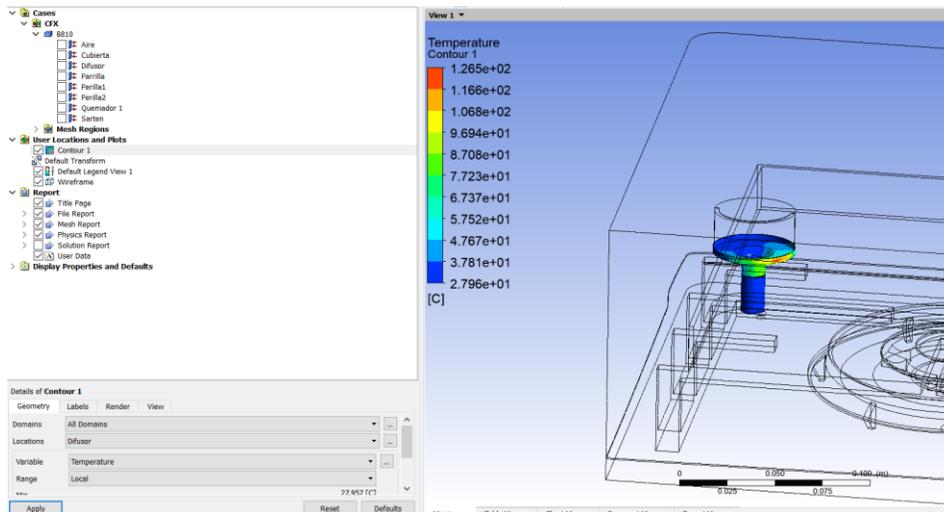


Ilustración 59. Contorno de temperatura en difusor de perilla.

Esta imagen muestra la distribución de temperaturas en el difusor de perilla, parte de esta información es verdadera, ya que experimentalmente se obtuvo una temperatura de 100°C, sin embargo, podría variar un poco de acuerdo con el punto exacto en el que se instrumentó (la posición exacta del termopar).

Se presenta una comparativa de los resultados obtenidos experimentalmente contra la simulación.

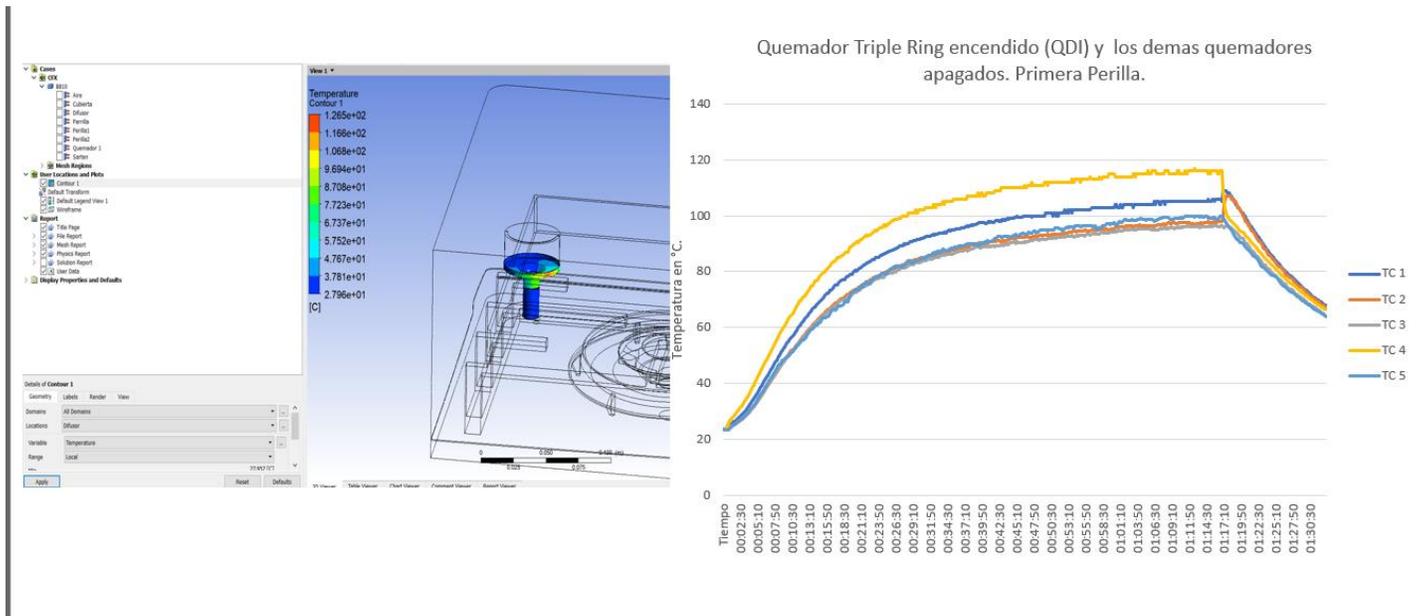


Ilustración 60. Comparación de resultados en difusor de perilla.

Como se puede apreciar en esta imagen, la simulación obtiene un resultado de temperatura máxima de 126°C mientras que experimentalmente se obtuvo una temperatura máxima de 100°C. Existe una diferencia de 26°C. Sin embargo, hay zonas del difusor que muestran temperaturas de 27°C, esto físicamente no es posible, por lo que la simulación no está del todo bien.

A continuación, se presentará una imagen de los vectores de velocidades. Esta imagen solo es como referencia ya que el estudio del fluido en este proyecto carece de importancia, el estudio se centra en la distribución de temperaturas en las perillas de la parrilla de empotrar.

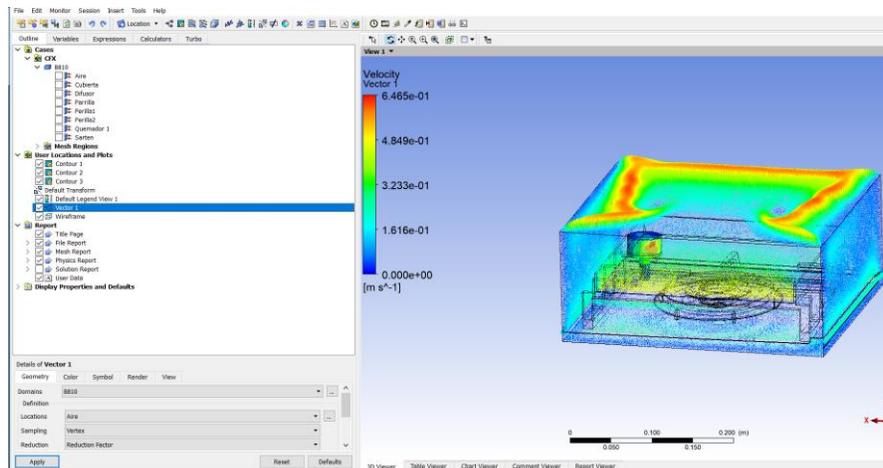


Ilustración 61. Vectores de velocidades del fluido.

Esta imagen representa los vectores de velocidades, lo que se puede resaltar de esta imagen es como el fluido caliente sobresale del “dominio” y toma la forma del sartén de cocina, y es donde se presenta la velocidad mayor.

## Discusión y análisis de los resultados.

En esta sección se presentará algunas hipótesis de la comparación de los resultados de la simulación y los experimentales.

La primera discusión que se presentará será relacionada a la distribución de temperaturas en la perilla.

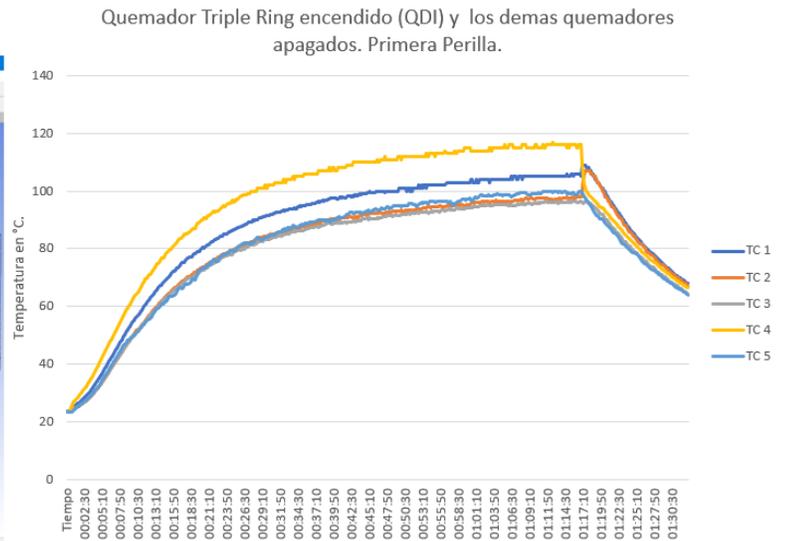
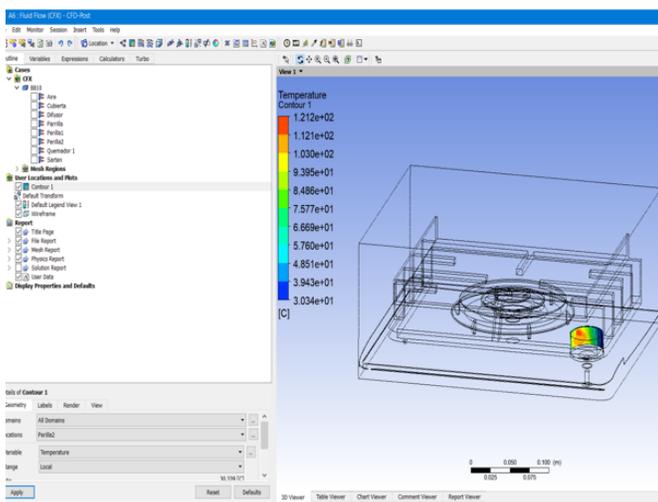


Ilustración 62.Comparación de resultados de simulación y los experimentales. (hipótesis).

Como ya se presentó el análisis de resultados hay zonas en la perilla con temperaturas en la simulación cerca de los 30°C. Las hipótesis que se plantean son las siguientes:

- ❖ Es posible que no se pusieran condiciones de transferencia de calor por conducción.
- ❖ El programa CFX no interpreta conexiones de contacto (el ensamble de perilla).
- ❖ Es posible que se tengan que agregar interfaces para indicar al programa conexiones de ensamble en la perilla y pueda interpretar transferencia de calor por conducción.
- ❖ Es posible que no se agregaron condiciones de transferencia de calor por convección.

Puede ser que por estas hipótesis la simulación no represente el 100% del fenómeno.

El error que representa esta simulación comparada con el valor máximo una vez que el sistema se estabiliza es la siguiente:

$$Error = \frac{|Valor_{Real} - Valor_{simulación}|}{Valor_{Real}} * (100\%)$$

$$Error = \frac{|116^{\circ}C - 122^{\circ}C|}{116^{\circ}C} * (100\%) = 5.174\%$$

Por lo que correlación es de un 100% - 5.174% = 94.827 %

La segunda discusión que se presentará será relacionada a la distribución de temperaturas en el difusor de perilla.

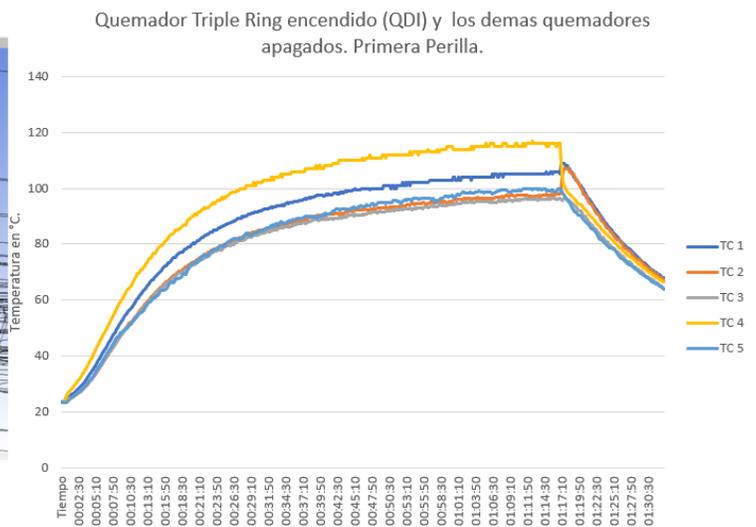
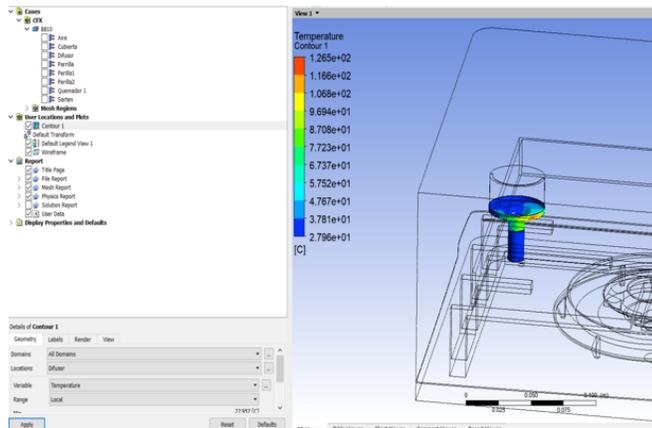


Ilustración 63.Comparación de resultados en difusor de perilla. (hipótesis).

La discusión se centra en la diferencia de temperaturas experimental contra la simulación, donde hay cerca de 26°C, la hipótesis que se plantea es la siguiente:

- ❖ Es posible que la zona de instrumentación del difusor no esté concorde al dato de simulación, por lo que existe esa diferencia de temperatura
- ❖ Las zona del difusor ceca de los 30° se deben a que no hay una condición de frontera que indique al programa transferencia de calor por conducción.

## Capítulo 5. Simulación numérica de combustión de un quemador de gas.

---

### Estudio y explicación de fenómeno de combustión en un quemador a gas.

En este capítulo de simulación se atenderán dos temas principales, el primero es el estudio de combustión de un quemador de estufa, debido a que de este depende la capacidad térmica del mismo quemador, con este estudio se pretende obtener las condiciones de frontera y entendimiento de dicho proceso de combustión.

El segundo tema se refiere precisamente a la calibración del modelo en la simulación CFD, dado que en el estudio anterior donde se consideró el quemador como un cuerpo que desprendía la misma cantidad de energía considerando que se mantiene estable y encendido durante un tiempo definido, esto no es del todo cierto, dado que físicamente la combustión depende de la velocidad del gas y del aire primario y secundario que tiene el quemador para poder mantener la combustión activa.

De esta manera se busca empatar los resultados de simulación numérica computacional con los experimentales, se ha tomado la decisión de hacer una simulación de combustión sobre un quemador a gas, dado que este camino es el correcto, en comparación con la simulación del capítulo 4 de este mismo desarrollo de investigación donde se suponía al quemador como un objeto radiante, en esta sección se presentará el análisis de combustión sobre el quemador y cuáles fueron los resultados obtenidos.

Para el desarrollo de la simulación de la combustión primero se citara la importancia que tiene que ver el mezclado de la inyección de gas con el aire primario del quemador como lo menciona [13], al salir el gas por el orificio inyector lleva una velocidad y una presión que al salir del orificio esta velocidad y presión se ven afectadas por la presión atmosférica y la combinación con el aire baja la velocidad ya que ahora el gas lleva un “arrastre” de aire para llevarlo a la cámara de mezclado o cámara de combustión.

Esta mezcla de combustible y aire primero llegan al Venturi del quemador y allí es distribuido dentro de la cámara de combustión donde finalmente terminan de mezclarse hasta salir por lo que se conoce como porta de quemador, esta porta de quemador es limitada en espacio por lo que se conoce como tapa de quemador, esta porta de quemador puede decir una porta de traslado, porta de ignición y porta funcional, donde finalmente la mezcla se enciende y se realiza la combustión dando como resultado una flama sobre sobre el quemador.

Esta flama que sale del quemador se le conoce como llama de difusión como lo menciona en [29] esta flama de difusión tiene dos propiedades, la cual se conoce como un proceso exotérmico ya que puede liberar derivado del proceso de combustión energía térmica y energía luminosa. Pero aquí no acaba todo el proceso ya que el tipo de quemador que se analizara no solo funciona con aire primario, si no que este quemador también requiere un aire secundario que es el aire que está en la atmósfera y que se requiere para tener una combustión completa [13].

Ahora que se ha descrito el comportamiento general del quemador para entendimiento del lector se tomara de referencia la imagen para poder explicar mejor el fenómeno.

La imagen es la siguiente.

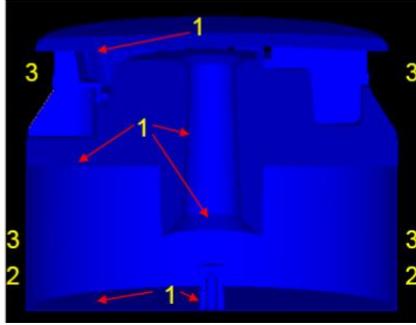


Ilustración 64. imagen ilustrativa de proceso de combustión de un quemador a gas.

Esta imagen señala con números desde el origen del proceso, lo que se define como inyección de gas y marcada con número (1), este punto es muy importante ya que es una condición de frontera de entrada, por el cual se deberá de haber calculado la velocidad del gas y la cantidad de volumétrica de gas que necesita el quemador dependiendo de la capacidad térmica para el cual fue diseñado, para poder funcionar adecuadamente, después tenemos marcado con el numero (2,3) el aire primario, que es el aire ambiente que será el que sea arrastrado por el flujo de gas hasta llevarlo al Venturi marcado con el numero 1 donde se consigue darle un poco de velocidad a la mezcla para llevarla a la cámara de mezclado, donde finalmente la mezcla saldara entre las portas del quemado y la tapa de quemador.

### Cálculo de flujo masico y velocidad en el orificio del inyector de gas.

Ahora que se ha descrito el comportamiento básico del fenómeno de combustión, se continuará con la condición de frontera de entrada para poder iniciar el análisis, se tendrá que hacer un cálculo teórico del flujo volumétrico de gas y la velocidad de entrada de gas. Este cálculo también se le conoce como calculo teórico de capacidad térmica o “Gas Rate” como lo describe en la tesis de doctorado [30], donde la entrada de calor nominal esta descrita con la siguiente ecuación.

$$Q_n = 0.278 \cdot \dot{V}_n \cdot H_s$$

Ecuación 17. Capacidad térmica de quemador en kW.

Donde y como lo señalan en [30]  $Q_n$  esta expresada en kilowatts,  $\dot{V}_n$  es la tasa de volumen de gas seco bajo condiciones de referencia correspondientes a la entrada de calor nominal en metros cúbicos por hora, y  $H_s$  es el poder calorífico bruto del gas de referencia dado en mega julios por metro cúbico.

Se recalca la importancia de este cálculo ya que será la condición inicial de la simulación. Para poder con el cálculo primera se necesitan definir un par de cosas, las cuales se listan de la siguiente manera junto con sus valores nominales para poder proceder con los cálculos.

- Capacidad térmica nominal de quemador 2.5kW.
- Tipo de gas. Gas natural
- Densidad del gas.  $0.612 \frac{kg}{m^3}$
- Poder calorífico de gas  $37.3 \frac{mJ}{m^3}$
- Diámetro de orificio de inyector. 0.25 in (para este cálculo).

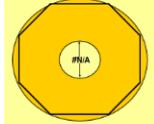


Ilustración 65. Diámetro nominal de inyector de gas.

Ahora se procede con el cálculo donde lo que se busca es saber que el flujo volumétrico de gas para poder después calcular el flujo de masa de gas. Así que la ecuación para este cálculo es la siguiente.

$$\dot{V}_n = \frac{Q_n}{0.278 \cdot H_s}$$

Ecuación 18. Volumen de gas.

Donde obtenemos que  $\dot{V}_n = 0.241093988080313 \frac{m^3}{h}$ . Ahora y con este dato se procede a calcular el flujo masico de gas que sale por el inyector.

Por lo que el flujo masico de gas es

$$flujo_m = \dot{V}_n \cdot \rho$$

Ecuación 19. Flujo masico de gas.

Donde obtenemos que  $flujo_m = 0.147549520705152 \frac{kg}{h}$ . Ahora y con este dato se procede a calcular el flujo masico de gas que sale por el inyector.

Sin embargo, para el cálculo se le agregara el 20% del valor calculado ya que es el aumento de la presión atmosférica más la manométrica que se agrega para el funcionamiento normal de la parrilla de empotre, por lo que  $flujo_{m+30\%} = 0.0000532817713657492 \frac{kg}{seg}$ .

Y por último para poder comenzar con la etapa de simulación se procede con el cálculo de velocidad de entrada de gas, la cual se calcula de la siguiente manera.

Velocidad de gas es igual al flujo masico de gas dividido por la densidad del gas multiplicado por el área del orificio del inyector.

$$V_{gas} = \frac{flujo_m}{\rho \cdot A_{inyector}}$$

Por lo que  $V_{gas} = 2.115 \frac{m^3}{s}$

## Simulación numérica computacional del fenómeno de mezclado para un quemador a gas.

La simulación numérica que se presentara a continuación se modelara tal cual siguiendo la metodología presentada en este mismo documento en el apartado de metodología de simulación.

La simulación será dividida en 3 partes, esto es por la complejidad del fenómeno, pero al mismo tiempo esto servirá para disminuir el tiempo de cómputo que se necesita para resolver las ecuaciones de gobierno de combustión.

Entonces la primera simulación que se requiere resolver es sobre un quemador de tamaño “mediano” el cual tiene una capacidad térmica nominal de 2.5 kW. La modelación CAD, también se ha trabajado en el programa creo parametric, y se ha mallado con el módulo de mallado de ANSYS MESH donde se han obtenido 594691 nodos y 3061097 elementos de malla en forma de tetraedros.

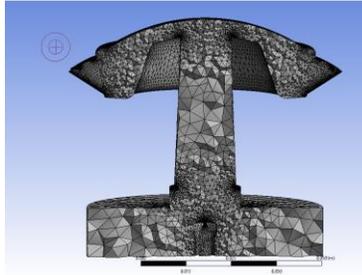


Ilustración 66. Imagen representativa de mallado de quemador mediano.

Al igual que lo mencionan en [31] , para la simulación velocidad y presión de salida en las portas de quemador, se ocupa un dominio de aire en la entrada del inyector por donde sale el gas, y un dominio de aire en la salida de las portas, por lo que el mallado del siguiente dominio y que será una interfaz de cálculo se ve de la siguiente manera.

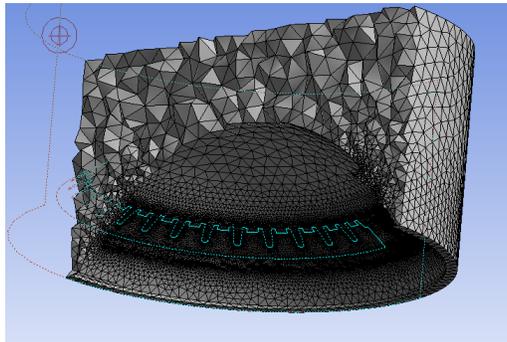


Ilustración 67. Imagen representativa de mallado e interfaz de quemador mediano.

Donde se obtienen 244875 nodos y 1292737 elementos de malla, una lección aprendida entre estas interfaces es que los elementos en las zonas de las portas deben ser iguales y mucho más “chicos” en comparación de las demás zonas del quemador ya que aquí justo en las portas es donde se requiere saber con mayor precisión el cálculo de velocidad y presión.

A continuación, se muestra una imagen del CFX-Pre que es el módulo donde se cargan los parámetros de simulación o condiciones de frontera. Para esta etapa se cargarán los catos calculados unos párrafos atrás en la sección de “(**Cálculo de flujo masico y velocidad en el orificio del inyector de gas**)”, **los cuales son;**

1.  $flujo_m = 0.147549520705152$
2.  $V_{gas} = 2.115 \frac{m^3}{s}$

Además de cargar las propiedad del gas que para este caso será gas metano, y que se aplicará sobre la entrada del inyector el flujo masico de gas, como se muestra en la siguiente imagen.

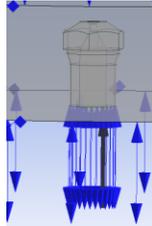


Ilustración 68. Condición de frontera del inyector de gas.

Los dominios de aire serán definidos por una superficie de frontera "Opening". A continuación, se muestran los resultados de la simulación.

### Resultados de simulación numérica computacional del fenómeno de mezclado para un quemador a gas.

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos de la simulación numérica del mezclado de gas para el quemador, lo que interesa saber con precisión y que se hace hincapié sobre ello, es la salida de velocidad y presión en las portas del quemador, por lo que el mallado en esta zona debe ser de buena calidad, y lo mismo ocurre a la salida del inyector, donde el gas ira arrastrando el aire primario para llevarlo al Venturi y después a la cámara de mezclado.

Como se aprecia en la siguiente imagen se calculado la fracción de masa de CH<sub>4</sub> (gas metano) que hay en todo el dominio, lo primero que hay que observar es la cantidad de fracción de masa que hay en el inyector y que por colorimetría se pinta en rojo, esto es totalmente normal ya que por el inyector donde entra el gas, y se va combinando con el aire primario, al centro se presenta una imagen de fracción de masa pero con las líneas de mallado, para poder observar con mayor claridad la zona donde la unión de malla es más pequeña por la precisión que se necesita para poder hacer el cálculo adecuadamente, y a la derecha se adjunta una imagen de la velocidad de vectores, como la colorimetría lo presenta la mayor velocidad

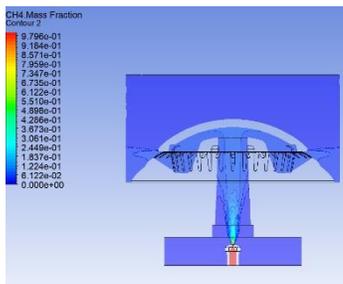


Ilustración 70. Fracción de masa en quemador.

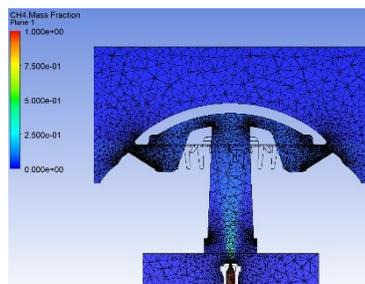


Ilustración 71. Fracción de masa en quemador, con vista de malla.

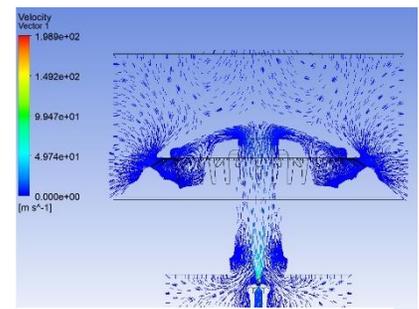


Ilustración 69. Vectores de velocidad para el dominio del quemador.

Ahora para concluir el proceso de mezclado de gas se presentarán los resultados de fracción de masa en las portas del quemador y la velocidad de salida en las portas del quemador, en la imagen de la izquierda se muestra la colorimetría, aunque existen valores desde azul a rojo, esto no representa un problema note que la diferencia en la escala y dada en notación científica es muy poca, los valores van desde 0.057 hasta 0.066, y en la imagen de la derecha se presenta la velocidad de salida en las portas, y como se muestra en la imagen esta esta desde 2.43 m/s hasta los 4.91 m/s, y como lo dice en [31] [30], estos valores son aproximados a la realidad

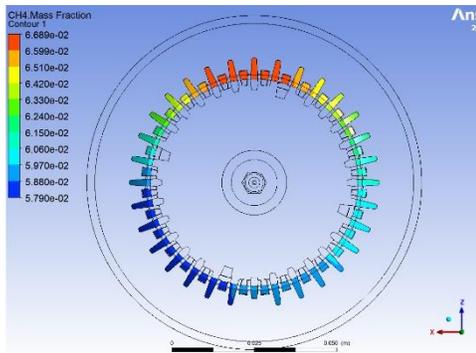


Ilustración 73. Fracción de masa en portas de quemador.

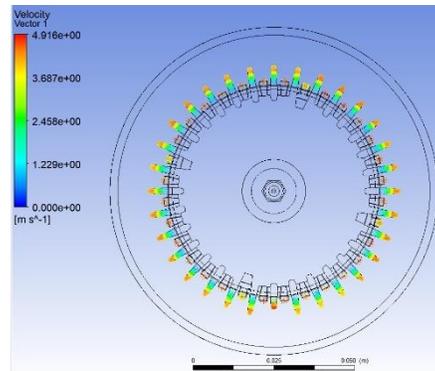


Ilustración 72. Velocidad de salida en portas de quemador.

## Resultados de simulación numérica computacional del fenómeno de combustión para un quemador a gas.

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos de la simulación de combustión del quemador, esta simulación solo es un medio para poder obtener una primera entrada del comportamiento del quemador, y después exportar todos estos conocimientos hacia un ensamble que nos permita calcular la transferencia de calor hacia la perilla, ya que esto último es el objetivo modular de la investigación.

Ahora la intención de combustión es de cierta manera exponer la temperatura que alcanzara la reacción química, la simulación de velocidad y fracción de masa a la salida de las portas, ayudara a saber cuál es la forma de flama, y como lo menciona en [31] [29] [30], el fenómeno de flotabilidad es realmente relevante ya que es este el que dará forma a las flamas del quemador.

Las condiciones de frontera para la combustión se realizarán en la interfaz meramente de la parte superior del quemador a gas, y la salida de flama estará sobre una condición de frontera de "aire-Opening", esta interfaz tiene dos objetivos, reducir el tiempo de cálculo en cómputo y mostrar por separado el fenómeno combustión. Como se muestra en la siguiente imagen para entendimiento.

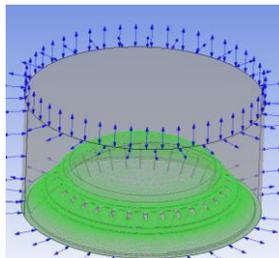


Ilustración 74. Imagen de condición de frontera, Quemador-Combustión.

Como se muestra en la imagen la parte en verde es el quemador y se ha puesto una condición de frontera para las portas del quemador que son las que contienen la información de velocidad y fracción de masa, y el cilindro que encierra el quemador es el aire secundario.

Ahora se muestran los resultados obtenidos:

La imagen siguiente muestra de cierta manera la forma que tiene la flama, si lo viéramos de una vista frontal, como se ve la simetría en estos casos es importante de conseguir y observa puesto que es un caso aislado, se explicara mejor esto en la siguiente sección, pero básicamente se trata de conseguir la misma fracción de masa en las portas del quemador puesto que el modelo CAD y Físico son simétricos, resultaría bastante extraño obtener diferentes valores en este caso aislado.

Ahora nótese que la temperatura en el portaje del quemador es básicamente la temperatura del ambiente, como lo mencionan [29], hay una zona “fría” en la flama del quemador, esto es normal y según lo describe [32] la temperatura del gas también es normal o es lo esperado, véase también la simetría y la forma que toma con los contornos de temperatura alcanzando los 1983°C.

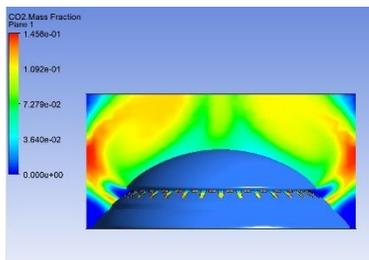


Ilustración 76. Combustión en quemador.

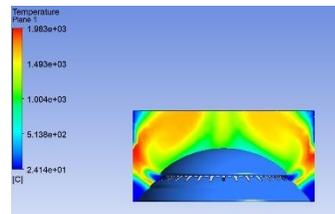


Ilustración 75. Temperatura de flama en quemador.

Nótese también que el dominio fue de aire fue insuficiente y esto podría afectar directamente la forma de la flama incluso la temperatura obtenida ya que este quemador también trabaja con aire secundario, por lo que fue necesario aumentar este dominio y volver a correr la simulación, los resultados a continuación.

Se presenta primero el comportamiento de vectores de velocidad, y como se puede ver en la imagen la simetría que se logra alcanzar es bastante clara y se puede notar como al aumentar el dominio, la combustión logra incluso tomar aire justo en la esquina del quemador.

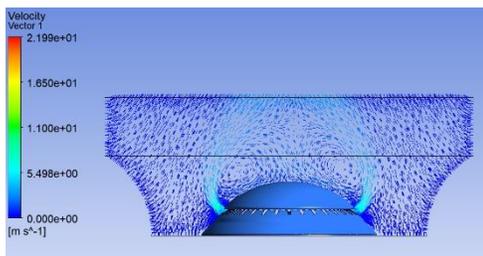


Ilustración 77. vectores de velocidad en combustión.

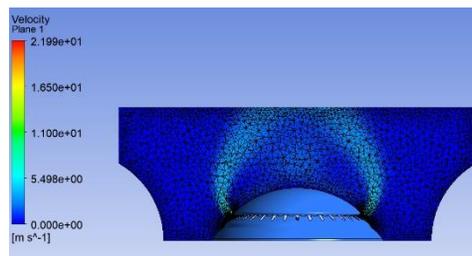


Ilustración 79. Vectores de velocidad y mallado.

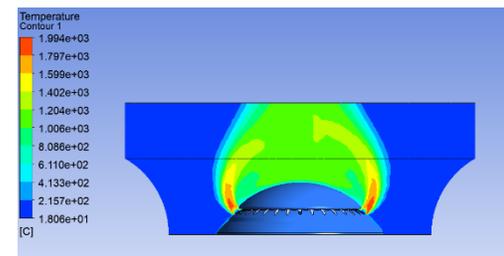


Ilustración 78. Temperatura de combustión.

Nótese el espectro de flama, que en comparación con la simulación anterior ahora es más uniforme y claro la temperatura entre más lejos de la porta es menor.

Por último, se mostrará, aunque de manera muy “burda” la forma de la flama, aunque implícitamente en el espectro de temperatura ya se puede apreciar incluso está bastante definida en los resultados de vectores de velocidad.

La primera imagen representada como fracción de flama se puede apreciar la simetría, aunque es bastante resaltar que como lo menciona en [31], si se quisiera tener una forma más real de flama lo que se buscaría es tener un mejor control de malla en la zona de portaje, básicamente tener elementos “simétricos”, como los cubos, son una buena opción, y aunque el objetivo no es el estudio directo de la forma de flama, es super importante mencionarlo.

En la imagen que representa la temperatura de flama se puede observar que los elementos de malla para darle forma a la flama son demasiado grandes, pero al menos da una buena idea de cómo es el espectro de flama.

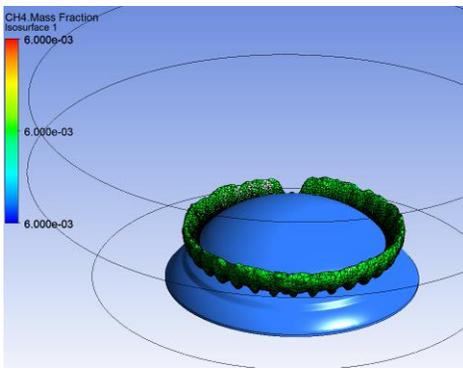


Ilustración 81. Forma de flama representada como fracción de masa.

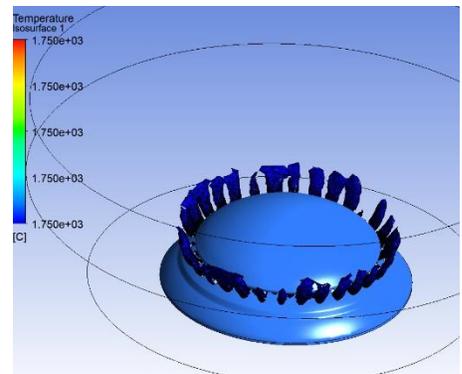


Ilustración 80. Espectro de flama representado por temperatura.

se enfatiza que la caracterización de flama y de forma de flama no es objetivo de esta investigación, pero nótese que todo este conocimiento es necesario para poder realizar la simulación de transferencia de calor desde el quemador que es la fuente de energía, y llevar esta energía hasta la perilla que es donde queremos conseguir la distribución de temperatura.

Por lo que en la siguiente sección y tomando toda esta experiencia adquirida para la simulación del fenómeno de mezclado y fenómeno de combustión sobre el quemador, se realizara la simulación con los datos obtenidos de estas simulaciones para que sirvan de entrada para la simulación de transferencia de calor.

## Capítulo 6. Simulación de transferencia de calor entre un quemador a gas y una perilla de material plástico.

---

En este capítulo se presentara la simulación de transferencia de calor entre el quemador y una perilla, dicha simulación se obtuvo derivado de las simulaciones anteriores, puesto que se necesitaba saber primero el mezclado de gas para obtener la velocidad y fracción de masa en las portas del quemador y después hacer una simulación de combustión como objeto aislado, con el fin de saber si dicha simulación de combustión se aproximaba a realidad, esto sirvió para aminorar los tiempos de cómputo y de cierta manera para ganar experiencia y confianza para realizar esta nueva simulación.

### Procesamiento de simulación ensamble CAD y Limpieza de modelo CAD.

A continuación, se presenta el ensamble CAD el cual está formado por una cubierta, la perilla, una parrilla de fundición, un comal, el quemador y tapa por supuesto (en la imagen cubiertos por el dominio de aire), y por los tres dominios de aire, el aire primario el secundario y el aire global de ensamble mostrado como un cubo translucido.

El procedimiento con el que se analizó esta simulación sigue siendo el mismo que el mostrado en la sección de (Procesamiento de metodología de simulación). Solo se mencionará que para esta simulación se limpió el CAD solo para dejar la interfaz de portaje (donde ya se tiene la información para correr la combustión) y la interfaz de perilla que se necesita para hacer el análisis de transferencia de calor, por lo que el ensamble al finalizar la limpieza del CAD se muestra en la imagen de la derecha.

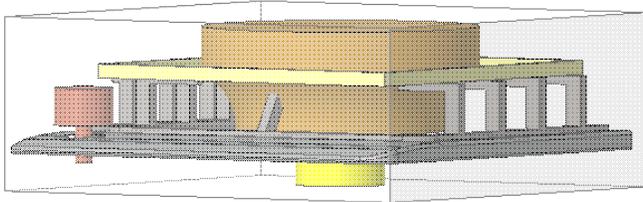


Ilustración 83. Modelo CAD de ensamble de parrilla.

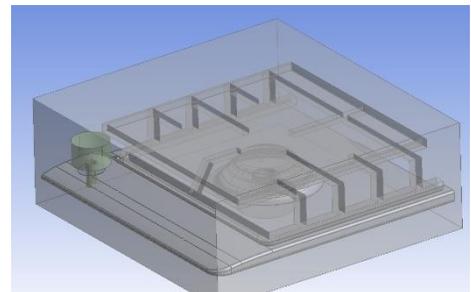


Ilustración 82. Limpieza de modelo CAD.

Siendo el modelo CAD limpiado se procede con el mallado del de ensamble, este mallado podrá ser burdo en las zonas más lejanas del quemador, sin embargo, se recuerda que en la zona de portaje el mallado debe ser el mismo con el que se corrió la simulación de combustión y el mallado en la perilla puede ser un poco más grande, pero se debe tener cuidado ya que los resultados de temperatura podrían variar dependiendo el mallado, y la zona de estudio es la perilla.

## Mallado de ensamble para simulación de transferencia de calor.

A continuación, se presenta el mallado del ensamble, donde se obtuvieron 1,701,188 de nodos y 8,956,119 de elementos, una cantidad mucho muy superior a las simulaciones mostradas anteriormente, por lo que se espera que el tiempo de cómputo o calculo sea mucho más prolongado. Ahora como se puede notar con un azul tenue se marca la interfaz de la perilla, el cual nos servirá para pasar del medio de aire (fluido) al medio sólido y así poder calcular la transferencia de calor.

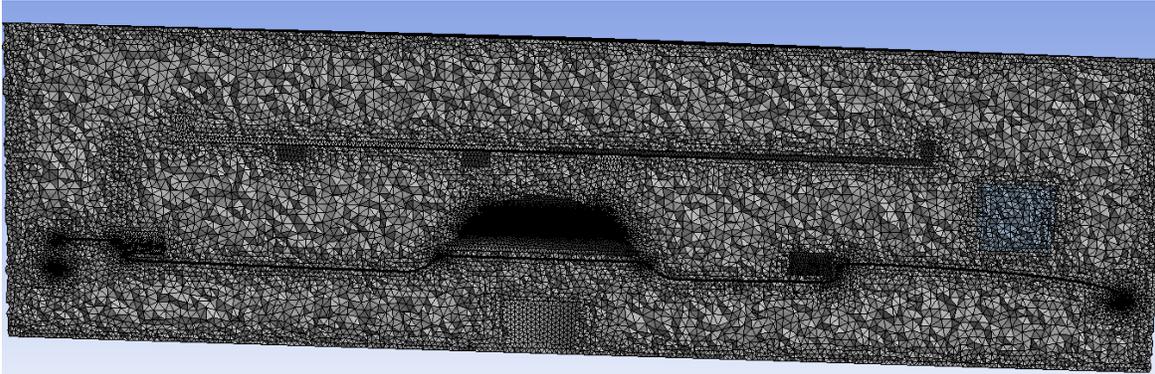


Ilustración 84. Mallado de ensamble para simulación numérica.

## Condiciones de frontera para simulación de transferencia de calor.

Después de realizar el mallado continuamos con las condiciones de frontera, donde se asignó en la zona de portaje los valores de velocidad y fracción de masa que se modelo en el quemador como elemento aislado, y se forma la interfaz de perilla donde se le cargan las especificaciones del material de la perilla y la emisividad térmica.

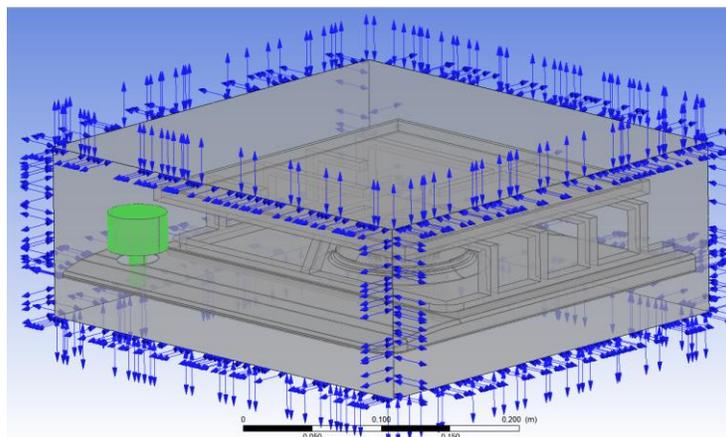


Ilustración 85. Condiciones de frontera del ensamble.

Nótese que en el ensamble ya se encuentran la parrilla, el sartén, y la cubierta, las cuales se han considerado como condiciones de frontera "Wall" ya que así reducirá el tiempo de cómputo y la temperatura que se pueda tener en estas superficies esta fuera del interés de esta investigación.

## Resultados de simulación de transferencia de calor entre un quemador a gas y una perilla.

En esta sección se presentarán obtenidos de la simulación numérica, donde lo primero que se presentaran son los gráficos de residuales. Como se podrá dar cuenta, en la imagen siguiente, los residuales de momento y masa tienen una buena “curva” de convergencia, además en este estudio al igual que en el de combustión asilada se ha agregado la curva (mass imbalance), fracción de masa, ya que este es un indicador importante porque tiene relación directa a la perdida de combustible CH4.

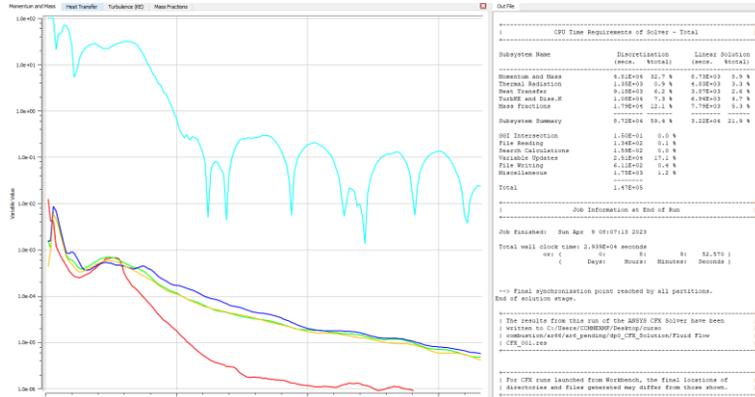


Ilustración 86. Curvas residuales de masa, momento y fracción de masa de CH4.

Ahora y por último se presentará el postproceso de la simulación. Lo primero que se mostrara es la fracción de masa que se obtiene en el portaje de quemador, con el fin de poder comprobar la simetría de fracción de masa que sale de las portas. El valor obtenido tiene una buena relación y poca variación según [30].

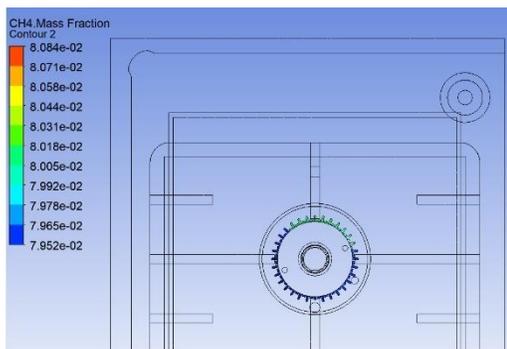


Ilustración 87. Fracción de masa en quemador.

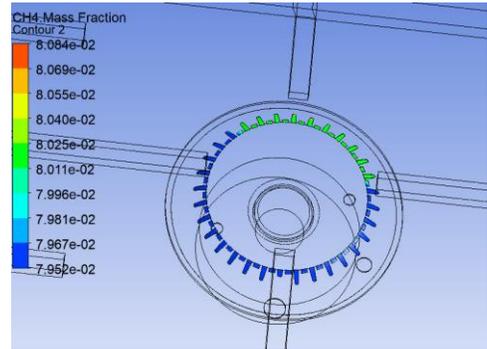


Ilustración 88. Fracción de masa en quemador.

Ahora se presentará el comportamiento que se obtuvo en la simulación de combustión del quemador hagas, nótese que en la siguiente imagen se muestra la temperatura que se obtuvo, en la imagen de colorimetría se puede apreciar que el espectro de flama no es del todo simétrico, sin embargo este resultado bastante sorprendente ya que en la realidad el fenómeno no es simétrico, y el comportamiento de la flama es muy similar al de la realidad donde la flama al ser limitada en espacio por la cubierta y el comal que esta encima del quemador, pues limitan el aire secundario para realizar la combustión, por lo que la misma flama busca el aire secundario, dando como resultado una flama alargada hacia arriba y “plancharse” hacia los lados, tratando de tomar el aire necesario para poder continuar con la reacción de combustión.

En la escala de colorimetría se muestra un resultado muy similar al de la simulación como caso aislado, donde las temperaturas antes de la ignición de flama están a temperatura ambiente y la zona más caliente de la flama alcanza hasta 1786 °C que es una temperatura esperada como lo dice [30] [29] [32].

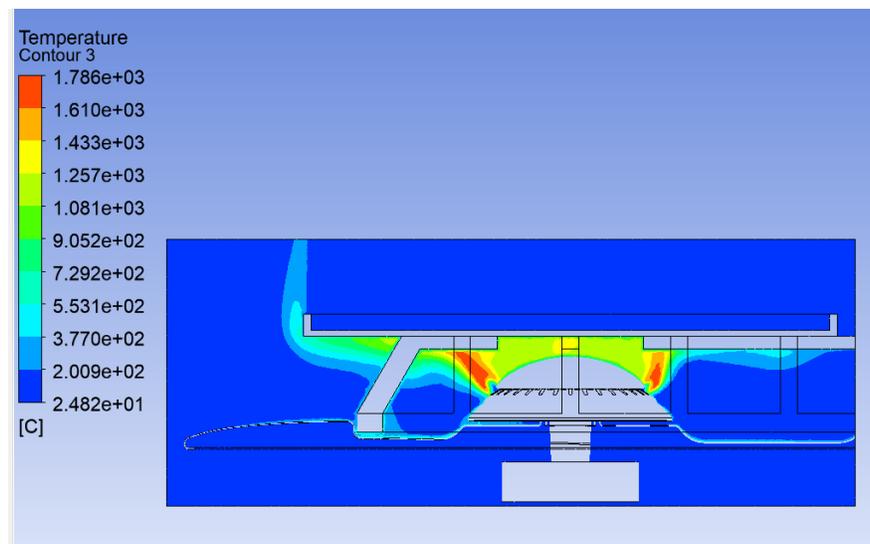


Ilustración 89. Fenómeno de combustión en ensamble global.

Revisando estos resultados se procede con el postproceso de la transferencia de calor del quemador a la perilla.

Los resultados que se obtuvieron en esta simulación de transferencia de calor se presentan a continuación. En la siguiente imagen se muestra la distribución de temperaturas en la perilla, nótese que la parte más caliente de la perilla en la colorimetría se muestra justamente en la esquina del comal, que es la parte de la circunferencia de la perilla más cerca del comal, esto también sucedió en la experimentación física, y justamente en la parte posterior de la perilla, (la parte que da espalda a la parte más cercana hacia el comal), es por colorimetría de una temperatura más baja. Ahora haciendo con la temperatura obtenida físicamente que fue de 121°C resulta de cierta manera una buena correlación, entre simulación contra la experimentación.

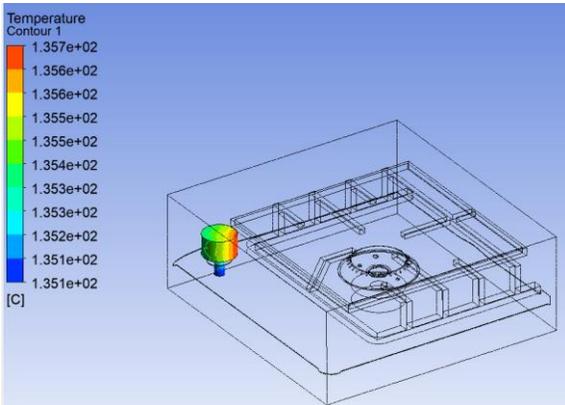


Ilustración 91. Distribución de temperaturas en la perilla.

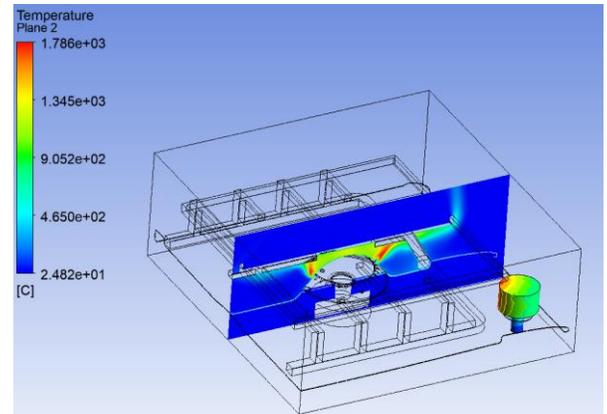


Ilustración 90. Distribución de temperaturas en perilla.

El error obtenido es el siguiente.

$$Error = \frac{|Valor_{Real} - Valor_{simulación}|}{Valor_{Real}} * (100\%)$$

$$Error = \frac{|121^{\circ}C - 135^{\circ}C|}{121^{\circ}C} * (100\%) = 11.57\%$$

En la siguiente imagen se muestra un plano de corte justo en la esquina del comal con la intención de poder visualizar el valor obtenido de temperatura en la esquina del comal la cual fue de 299 °C, y el espectro de flama que se puede ver es un justo el esperado ya que el aire caliente tiene a subir y salir por el filo del comal.

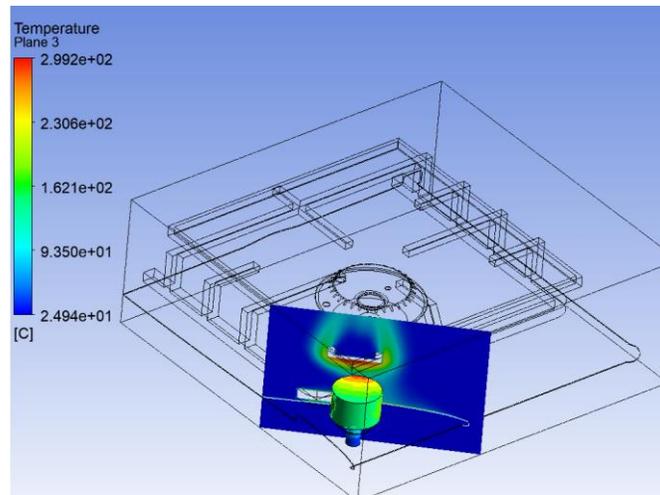


Ilustración 92. Distribución de temperaturas en las perillas.

## Conclusiones.

El estudio del fenómeno de transferencia de calor es un fenómeno bastante complicado de modelar y de simular, tal cual se ha expresado en esta investigación se han tenido que superar los retos de aprendizaje, uno de los más complicados fue poder aprender como poder hacer el modelado de mezclado y por otro lado el modelado de combustión, solo por mencionar los dos más complicados a lo que se tuvo que hacer frente.

Los resultados obtenidos en cada simulación no fueron ni por cerca obtenidos en el primer intento, las iteraciones que se tuvieron que hacer fueron bastantes, por lo que también se obtuvo bastante experiencia en poder modelar las simulaciones.

Los resultados que se obtuvieron tienen un error menor al 15 por ciento, pero esto solo se pudo saber por la experimentación que se realizó, ya que al tener valores experimentales se pudo comparar con los valores de la simulación.

Para el primer caso de simulación los resultados obtenidos, comparados contra la experimentación física, menores al 6% de error, lo que representa que para este modelo de simulación un resultado positivo, puesto que es una excelente correlación con la experimentación y se debe considerar que para una simulación rápida y dar resultados aproximados, se puede considerar esta simulación como primer intento, sin embargo no se recomienda si se requiere modelar el modelo de combustión para saber la temperatura de la flama.

Los gráficos de termopares donde se sondea la temperatura de perillas durante el ensayo de laboratorio ayudaron bastante a comprender el fenómeno de transferencia de calor, ya que visualmente se ve como influye la cercanía del calor a las perillas, si se utiliza un sartén o una cacerola, la potencia del quemador, el material de construcción de cada pieza y como todo este conjunto de variables pueden dar un resultado completamente diferente en la temperatura de la perilla, por lo que es bastante importante tener un diseño preliminar CAD para poder darle posición virtual a todas estas piezas en el ensamble junto con la clasificación de materiales.

Para la simulación de combustión el principal problema que se tuvo fue el delimitar correctamente los parámetros de entrada junto con la precisión y tamaño de malla, las diferentes simulaciones que se hicieron fue para poder obtener un buen resultado de mezcla en las portas del quemador, que estos valores se han descrito en el capítulo 5 y que donde el tamaño de malla fue en primeras iteraciones de 0.080 in equivalente casi a los 2.032 mm, esto en verdad se tuvo que ir aprendiendo y experimentando en el camino, ya que de esta relación de tamaño de malla sería la precisión de salida de presión y velocidad de flama en las portas del quemador.

El haber utilizado la metodología de seis sigma con enfoque a la solución de problemas ayudo en gran medida a darle estructura a la investigación, ya que muchos de los procedimientos y experimentos no están establecidos y hubo que crearlos desde cero.

Dentro de esta investigación hubo dos fases críticas, la primera fue la etapa de medición, donde de forma experimental se obtuvieron parámetros de entrada que ayudaron a identificar las causas raíz del problema. La segunda etapa fue la de análisis, donde se analizaron los resultados de la experimentación y se pudieron hacer las primeras hipótesis y los primeros planteamientos de cómo se podía atacar el problema.

El desarrollo de esta investigación podrá ser base para futuras investigaciones, ya que se muestra explícitamente como se fue atacando el problema que metodologías se usaron como se hicieron los cálculos los programas utilizados y los parámetros que se tuvieron en cuenta para realizar las simulaciones.

## Trabajo a futuro.

Se visualiza como trabajo a futuro poder hacer una experimentación mucho más amplia en el mezclado de gas del quemador, esto con el fin de tener una mejor comprensión del fenómeno, y una experiencia más amplia del tema de mezclado de gases en cámaras de combustión para quemadores.

También se visualiza poder hacer una caracterización de llamas, con el fin de poder tener la información suficiente para hacer una comparación de flama entre la experimentación y la simulación en este tipo de fenómenos.

Otro trabajo a futuro es la caracterización de otros quemadores a gas, para enriquecer una base de datos que se formaría con los resultados de experimentación y simulación, con esta información se tendrían datos suficientes como para poder hacer estudios estadísticos que permitieran hacer algunos tipos de regresiones lineales o no lineales y hacer predicciones aproximadas en la obtención de mezclas, formas de flama y temperaturas de trabajo de ciertos quemadores con capacidades térmicas similares.

## Anexo.

Resultados de experimentación y gráficos de temperaturas en perillas.

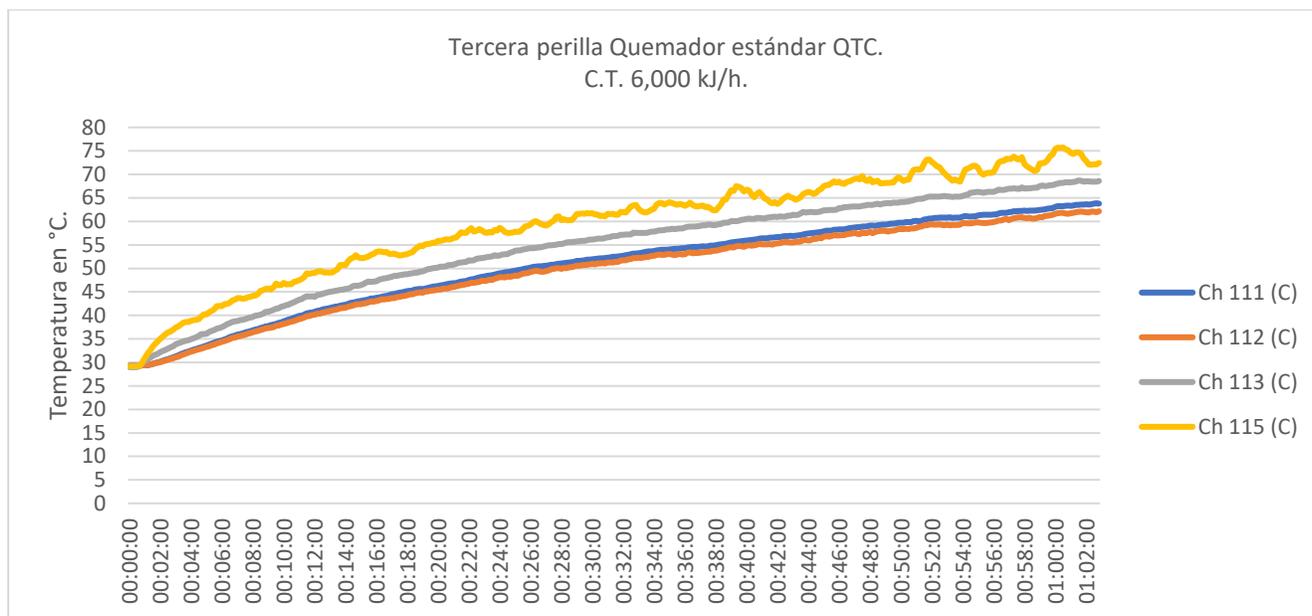


Ilustración 93. Gráfico temperaturas en perilla 3.QTC.Estándar.

Gráfico de temperatura de perillas, en este ensayo se observa el levantamiento de temperaturas en las perillas, se midieron 4 puntos en la perilla (tercera perilla de la parrilla de empotre). Se registran estas temperaturas y la temperatura más alta registrada fue casi de 75°C.

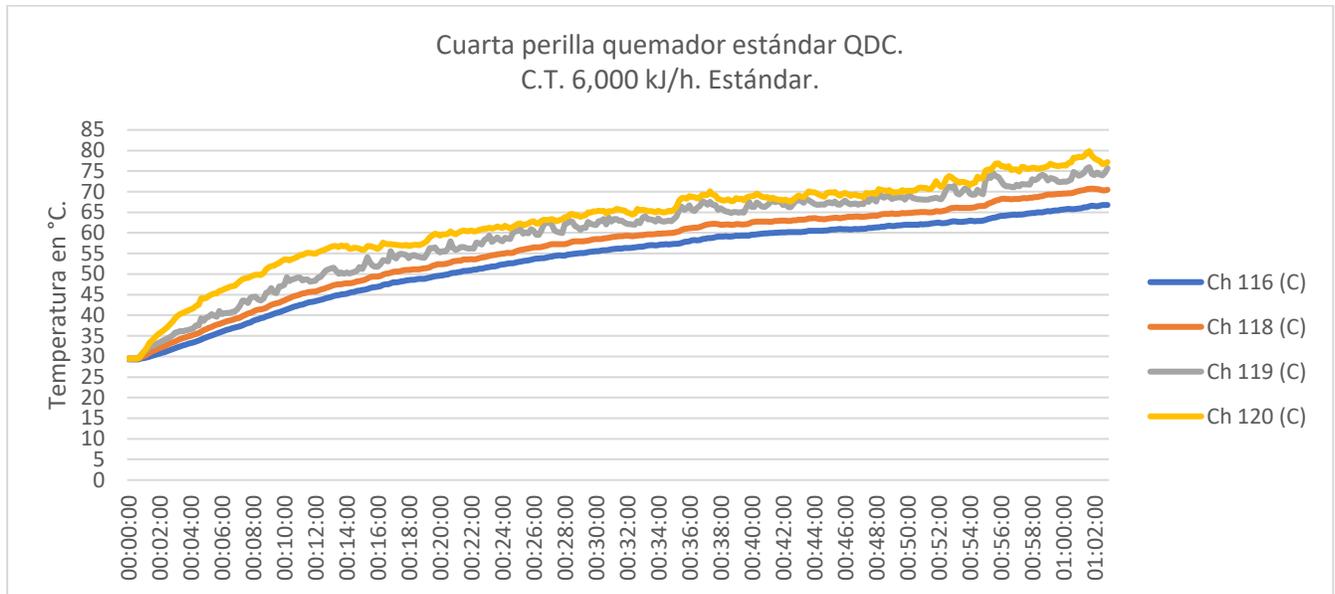


Ilustración 94. Gráfico temperaturas en perillas 4. QDC. Estándar.

Gráfico de temperatura de perillas, en este ensayo se observa el levantamiento de temperaturas en las perillas, se midieron 4 puntos en la perilla (cuarta perilla de la parrilla de empotre). Se registran estas temperaturas y la temperatura más alta registrada fue casi de 80°C.

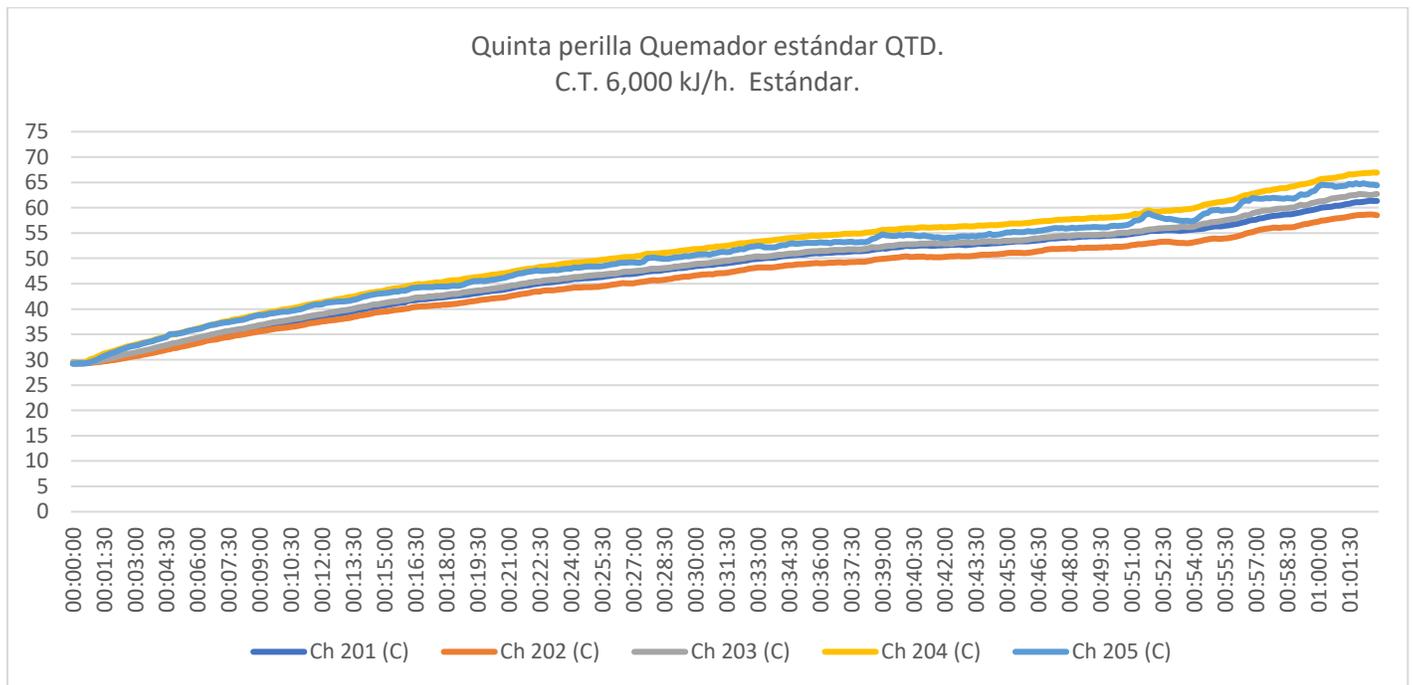


Ilustración 95 Gráfico temperaturas en perilla 5. QTD. Estándar.

Gráfico de temperatura de perillas, en este ensayo se observa el levantamiento de temperaturas en las perillas, se midieron 4 puntos en la perilla (quinta perilla de la parrilla de empotre). Se registran estas temperaturas y la temperatura más alta registrada fue casi de 66°C.

## Independencia de malla.

En este apartado se revisará a lo que se le llama independencia de malla, esta independencia proporciona información sobre los nodos y elementos con los que el programa hará los cálculos. Esto es bastante importante, de cierta manera se podría decir que entre menos nodos y elementos el tiempo computacional que se ocupara será menor, aunque pudiera ser afectado la precisión del cálculo, y entre más nodos y elementos el tiempo computacional será mayor pero el cálculo será más preciso, la intención de este estudio de independencia de malla es encontrar un punto medio donde se logre reducir el tiempo computacional de cálculo sin perjudicar la precisión del resultado del cálculo.

Para el Primer caso de independencia de malla (caso original) se generaron 1119825 nodos y 5876197 elementos y el tamaño de malla que se ocupó fue de 0.078 in o 2.00 mm

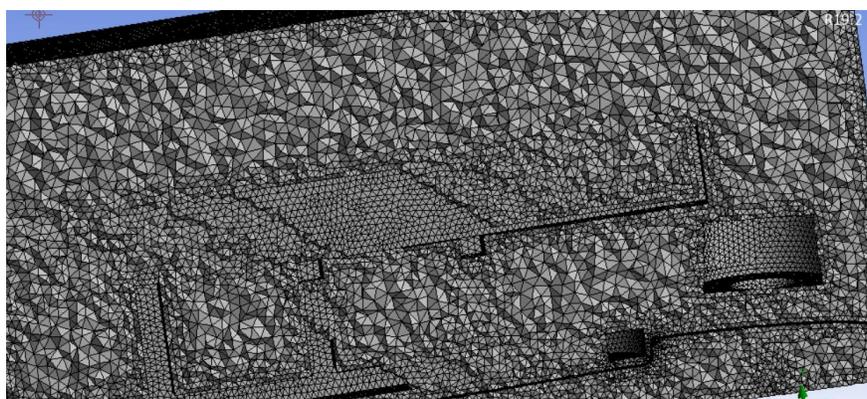


Ilustración 96. Independencia de Malla.

Esta imagen muestra en una corte de sección el tamaño de elemento que se generó para el caso base, el tamaño de malla utilizado fue 0.080 in tetraédrico.

Este mallado arrojó un resultado de temperatura máxima alcanzada en la perilla de 122°C.

El siguiente mallado se propondrá aumentado por un factor de 1.1, es decir a los 2 mm se le aumentará un tamaño de malla de 1.1 lo que dará un tamaño de malla de  $1.1 * 2 \text{ mm} = 2.2 \text{ mm}$ , este anti - refinamiento solo se hará al ensamble de perilla (dos partes de la perilla y al difusor de perilla).

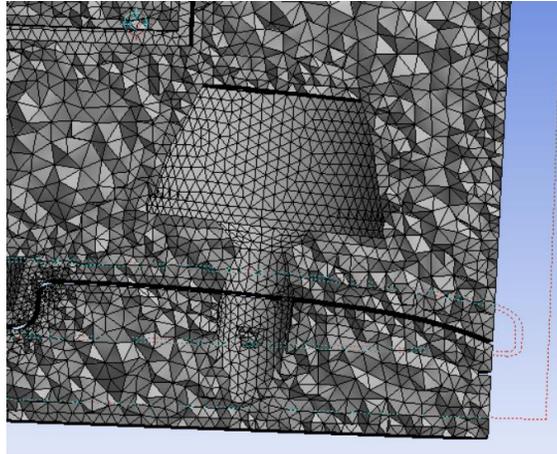


Ilustración 97. Malla aumentada por factor de 1.1.

Esta imagen muestra como en la zona de ensamble de perilla se aumentó el tamaño de elemento a 2.2 mm lo que dio como resultado un total de 1115962 nodos y 5861743 elementos.

Los resultados obtenidos en esta simulación de aumento de tamaño de elemento de malla son de una temperatura máxima en la perilla de 114 °C, que en comparación con la malla anterior hay una diferencia de 12°C, la imagen de colorimetría y contorno de temperaturas se muestran a continuación.

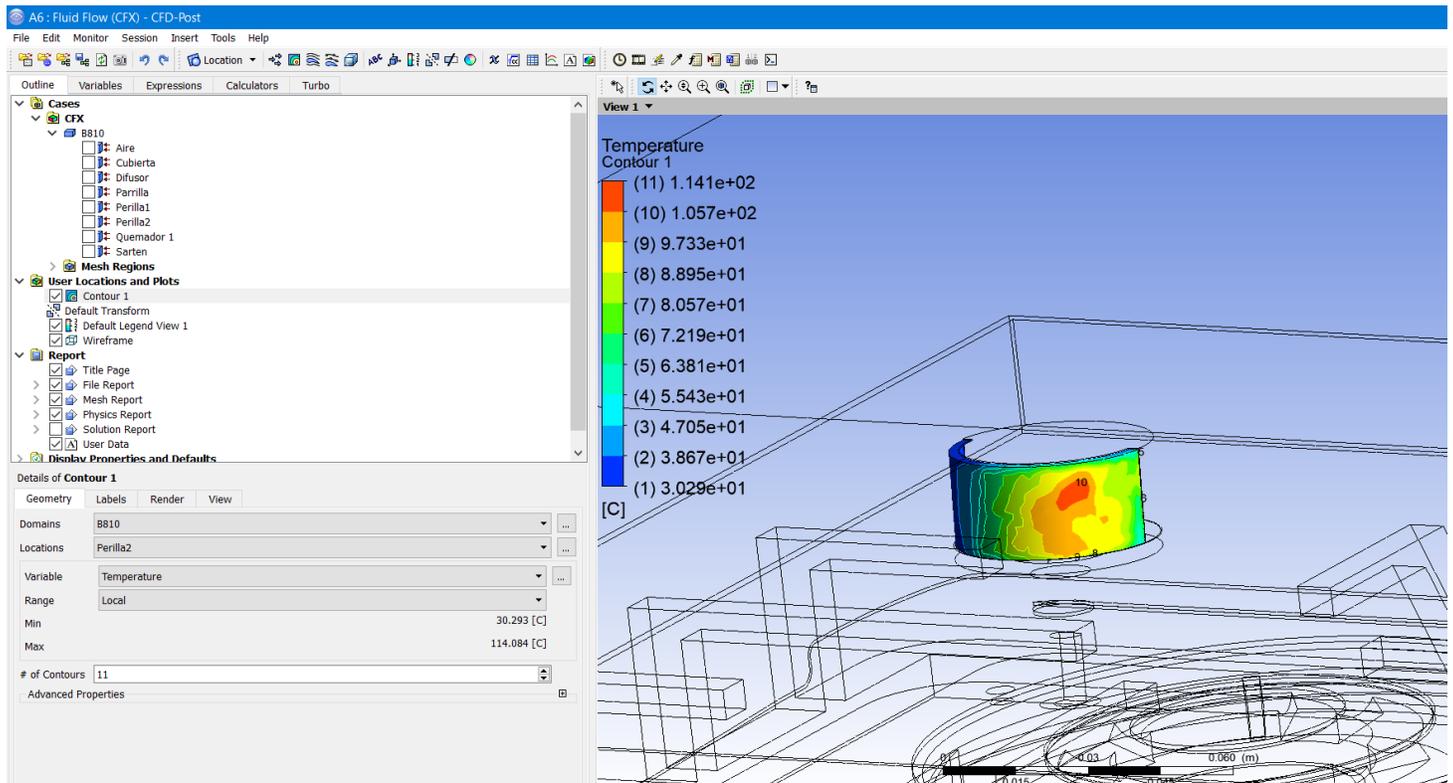


Ilustración 98. Temperatura máxima en perilla con aumento de tamaño de malla factor 1.1.

Para la siguiente simulación de independencia de malla el experimento se hará con el mismo factor de 1.1 pero ahora para reducir el tamaño de elemento, es decir el tamaño de malla original es de 2 mm por lo que la reducción será de  $2 \text{ mm} / 1.1 = 1.81 \text{ mm}$ , con este tamaño de elemento el número de nodos es de 1121429 y el número de elementos es de 5885354.

Con este refinamiento de malla y conservando las condiciones de frontera el resultado de simulación es el siguiente.

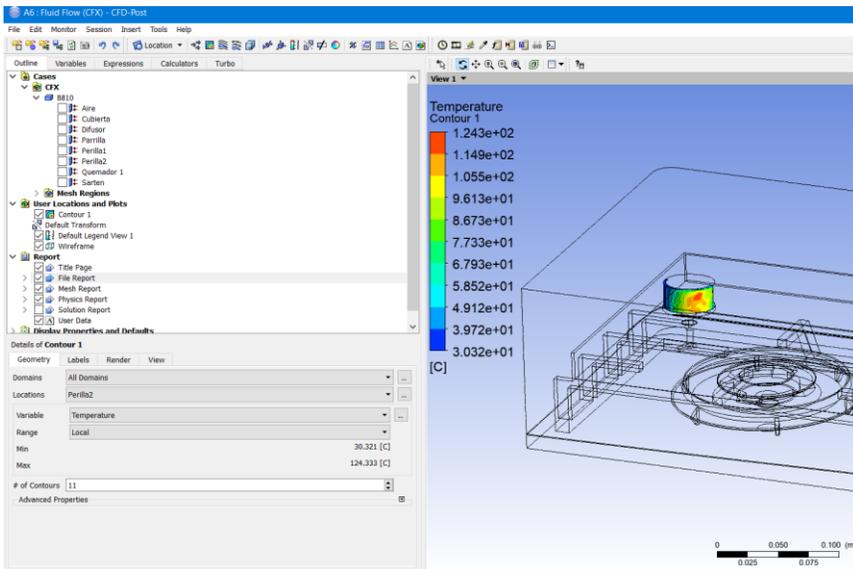


Ilustración 99. Temperatura máxima en perilla con reducción de tamaño de malla factor 1.1.

Como se puede apreciar la temperatura máxima en la perilla es de 124°C y en comparación con la simulación del tamaño de malla actual donde la temperatura fue de 122°C hay una diferencia de 2°C.

A continuación, se presentará una tabla de los “refinamientos de malla” que se hicieron.

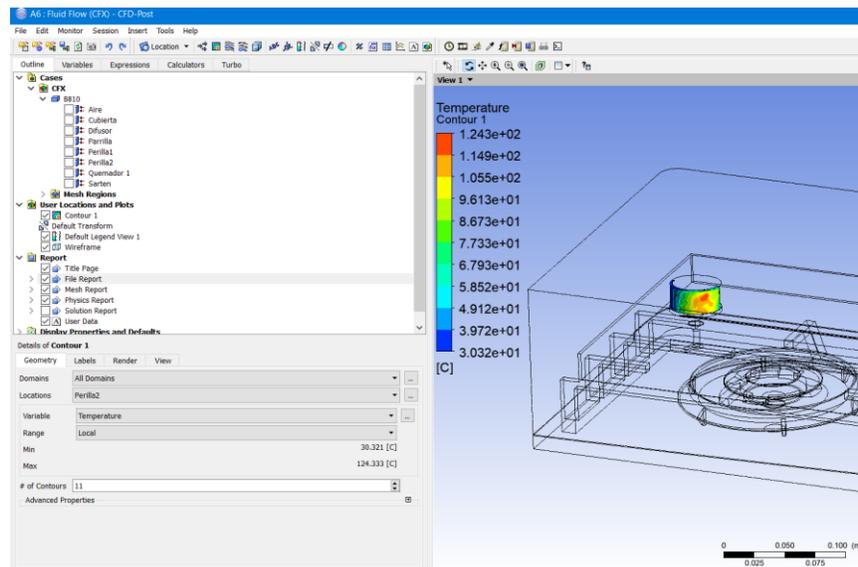


Ilustración 100. Temperatura máxima en perilla con reducción de tamaño de malla factor 1.1.

Como se puede apreciar la temperatura máxima en la perilla es de 124°C y en comparación con la simulación del tamaño de malla actual donde la temperatura fue de 122°C hay una diferencia de 2°C.

A continuación, se presentará una tabla de los “refinamientos de malla” que se hicieron.

Malla	Factor de refinamiento	Tamaño de elemento (mm)	Numero de Elementos	Numero de Nodos	Temperatura ( °C ).	Valor de medición	Error relativo
2	1.1	2.2	5861743	1115962	141	116	21.5517241
2	1.1	2	5876197	1119825	122	116	5.17241379
3	1.1	1.818181818	5885354	1121429	124	116	6.89655172
4	2	1	6047206	1151316	127	116	9.48275862
5	-	0.9	6099386	1161170	127	116	9.48275862
6	-	0.5	6730840	1278516	127	116	9.48275862

Ilustración 101.Tabla de refinamiento de Malla.

Esta tabla ilustra las iteraciones de refinamiento de malla que se hicieron y como se puede observar no hay gran diferencia entre los resultados de temperatura máxima que se obtuvieron.

La grafica de comparación de datos entre el número de elementos y la temperatura máxima es la siguiente. La intención de esta grafica es presentar los valor y de manera visual los diferentes resultados obtenidos con cada refinamiento de malla.

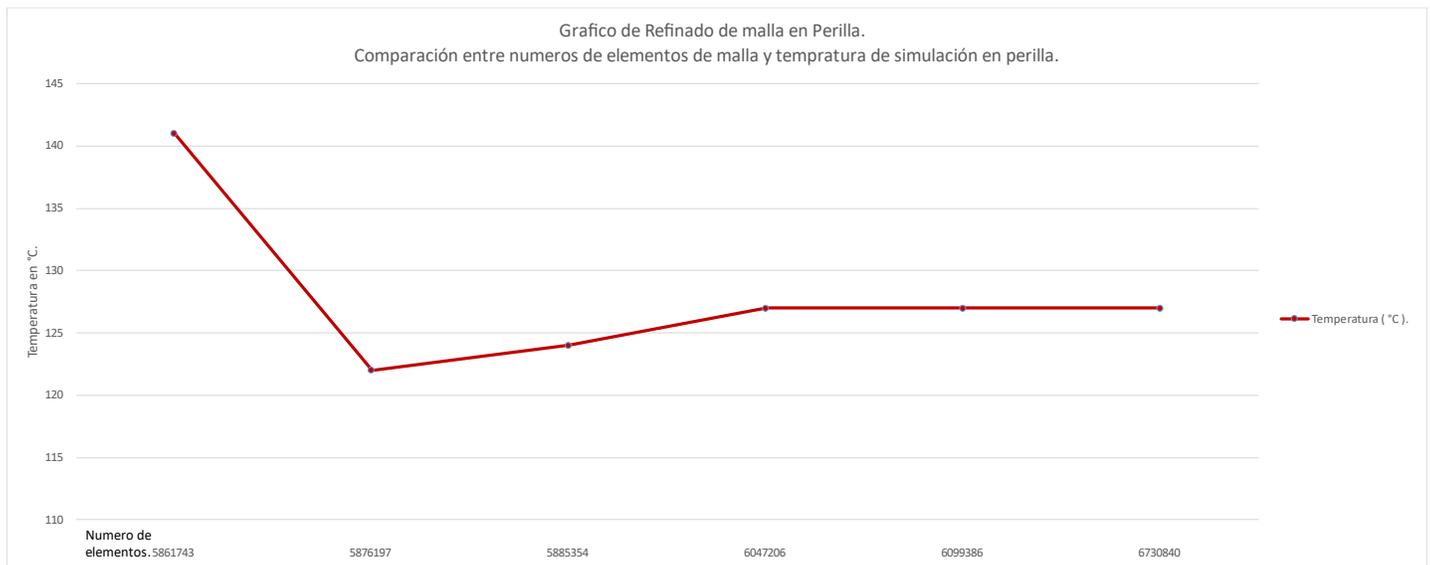


Ilustración 102.Grafica comparativa entre el número de elementos y temperatura de perilla.

Adicional a este refinamiento y con los resultados de temperatura máximos obtenidos se corrió una prueba T-student para ver si había una media estadísticamente significativa del valor de la media de estos resultados de temperatura.

Se presenta a continuación el siguiente grafico estadístico.

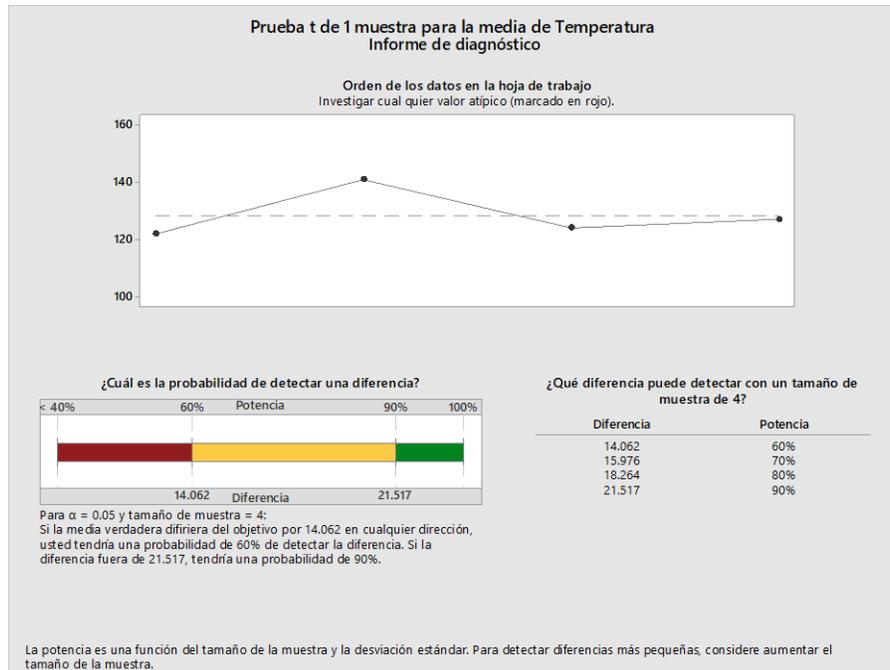


Ilustración 103. Prueba estadística T-Student.

Como se puede apreciar en el gráfico y aunque el tamaño de muestra es muy pequeño no se refleja una diferencia estadística entre los resultados de temperatura máxima obtenidos.

Obviamente no se puede concluir con tan pocos datos recopilados, se recomendaría obtener más muestras de refinamiento de malla.

# Referencias

---

## Bibliografía.

- [1] Mabe, «Reporte Mabe replica de experimento,» Laboratorio de estufas Mabe, Querétaro, Querétaro, 2020.
- [2] M. G. Jhon F. Hincapié, «CFD modeling of the conjugate heat Transfer Inside a door of gas ovens.,» de *2014 ESSS conference & ansys users metting*, Universidad Santo Tomás, bogotá - Colombia., 2014.
- [3] A. J. G. Yunus A. Çengel, *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones.*, México, D.F.: McGRAW-HILL/interamericana editores, S.A. DE C.V., 2007.
- [4] A. M. J. E. Vera Romera Iván, «Análisis preliminar de transferencia de calor en una estufa lorena.,» de *Memorias del xvi congreso internacional anual de la somim*, Monterrey, Nuevo León, México., 2010.
- [5] D. J. Zube, *Heat transfer efficacy of Biomass Cookstoves*, Colorado State University.EUA, 2010.
- [6] J. Q. y. A. H. L. Boccaccini, «Estudio experimental de la radiación térmica emitida por una estufa de alto rendimiento.,» *Estudio experimental de la radiación térmica emitida por una estufa de alto rendimiento.*, p. 10, 29 Junio 2018.
- [7] M. A. B. Yunus A. Cengel, *Termodinámica séptima edición*, México, D.F.: McGRAW-HILL/Interamericana Editores, S.A. DE C.V., 2012.
- [8] P. E. Tippens, *Física conceptos y aplicaciones séptima edición revisada*, México, D. F.: McGRAW-HILL/Interamericana Editores, S.A. DE C.V., 2011.
- [9] R. Crawford, *Plastics engineering. third edition.*, Linacre House. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [10] É. Hermida, *Polímeros*, Ciudad autónoma de Buenos Aires, república Argentina: Ministerio de educación. Instituto nacional de educación tecnológica., 2011.
- [11] J. F. M. S. Guzman, *Manual de plásticos para diseñadores. Primera edición.*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.: Facultad del habiat, 2011.
- [12] Covestro Deutschland AG, «Product range. Typical values. COV00072448,» Covestro Deutschland AG, D-51365 Leverkusen, Germany., 2018-02..
- [13] D. I. E. B. –. D. I. S. D. Romano, *Combustión*, Departamento de ingeniería mecánica y naval, facultad de ingeniería, UBA, 2003.
- [14] O. L. N. / P. T. Jara, *Introducción al análisis térmico y de fluidos mediante Ansys*, Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala, 2018.
- [15] Asturias corporación universitaria., *Implantación, metodologías y herramientas seis sigma.*, Asturias corporación universitaria..
- [16] R. A. Gómez montoya y S. Barrera Rendón, «Seis sigma : un enfoque teórico y aplicado en el ámbito empresarial basándose en información científica,» de *Six sigma : a theoretical focus applied in companies with a scientific information basis*, Corporación universitaria lasallista, 2011.
- [17] H. G. P. / R. d. L. V. Salazar, *Control estadístico de calidad y seis Sigma 2DA Edición.*, México: McGRAW-HILL/interamericana editores, s.a. de c.v, 2009.
- [18] C. E. A. Rodriguez, *exploracion de la metodologia top down design en sistemas cad para el desarrollo de un modelo de ingenieria*, Medellín, Colombia.: universidad eafitt, departamento de ingeniería de diseño de producto, 2006.
- [19] a. y. c. d. l. m. d. d. t. d. y. b. Up, *Verónica Pauline Restrepo Muñoz*, Medellín, Colombia.: Universidad EAFIT., 2009.
- [20] ESSS, «ESSS,» Computer simulation specialist, 24 JUNE 2016. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>. [Ultimo acceso: 29 OCTUBER 2021].

- [21] M. Z. Pina, *Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo Oscilatorio.*, Cartagena, Colombia.: Universidad politécnica de Cartagena/ Industriales ETSII UPCT, 25 ABRIL 2016.
- [22] Omega engineering inc., «Omega a spectris company,» Omega engineering inc., [En línea]. Available: <https://mx.omega.com/temperature/Z/pdf/z203.pdf>. [Último acceso: 28 Julio 2021].
- [23] Fluke corporation, *Sistema de obtención de datos/multímetro digital 2638A Hydra Series III*, Latin America: Fluke calibration, 8/10/2021.
- [24] *Norma oficial Mexicana NOM-010-SESH-2012, Aparatos domésticos para cocinar alimentos que utilizan gas l.p. o gas natural. Especificaciones y métodos de prueba.*, Diario oficial., 2013, p. 57.
- [25] Flir systems, Inc., *User's manual flir T6xx series*, United States: Flir Systems, Inc., 2019.
- [26] Optris. Infrared thermometers, *Principios fundamentales de la medición de la temperatura sin contacto.*, Berlín, Alemania.: Optris GmbH.
- [27] Hukseflux thermal sensors, *RC01. Radiation / Convection (RADCON) Heat Flux Sensor*, Hukseflux thermal sensors.
- [28] I. ANSYS, «Ansys CFX-solver theory guide,» Canonsburg (Pensilvania), ANSYS, Inc. is, November 2011, p. 418.
- [29] J. C. R. Granados, *Caracterización de llamas mediante mediante termometría de doble longitud de onda e interferometría de desplazamiento lateral*, León, Gto.: Centro de investigaciones en optica, A.C., 2006.
- [30] L. Gattei, *A study on the fluid dynamics of domestic gas burners*, Bologna: Alma mater studiorum - universita' di bologna, 2008.
- [31] D. E. A. d. C. Campo, «Aplicación de la simulación en el diseño y/o mejora de sistemas de combustión en aparatos de uso domestico.,» 18 10 2010. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/65815252-Aplicacion-de-la-simulacion-en-el-diseno-y-o-mejora-de-sistemas-de-combustion-en-aparatos-de-uso-domestico-dr-ernesto-arias-del-campo.html>.
- [32] G. L. P. Loaiza, *Técnicas de obtención de la temperatura de flama teóricas y experimentales.*, Cuernavaca,morelos.: Cenidet, 1995.
- [33] D. Malacara, *Óptica básica*, México, D.F.: Fondo de Cultura Economica, 2015.
- [34] I. P. L. C. U. C. D. PERÚ., «Instituto para la calidad universidad católica de Perú.,» publicado por Calidad PUCP, martes 27 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://200.16.4.26/el-asesor/six-sigma-principales-metodologias#sthash.hBOb35EO.dpbs>.
- [35] B. & J. / E. R. J. / F. P. Beer, *Mecánica de materiales 5ta Edición*, México, D. F.: McGRAW-HILL/Interamericana editores, S.A. DE C.V., 2010.
- [36] ESSS, «ESSS,» Computer Simulation Specialist, 24 JUNE 2016. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>. [Último acceso: 29 October 2021].
- [37] M. Z. P. / J. P. S. F. / R. H. Martín, *Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo osilatorio.*, Cartagena, Colombia: Universidad politécnica de Cartagena., 25 Abril 2016.
- [38] V. P. R. Muñoz, *Aplicación de la metodología de diseño top down Y bottom up.*, Medellín, Colombia.: Universidad EAFIT. Departamento de producción., 2009.
- [39] C. E. A. Rodriguez, *Exploración de la metodología top down desing en sistemas cad para el desarrollo de un modelos de ingeniería.*, Medellín, Colombiay.: Universidad eafit, departamento de ingeniería de diseño de producto., 2006.