



**Modelamiento y optimización de las condiciones de reacción de combustión,
del proceso de fusión de acero reciclado, con GLP y aire enriquecido en un
horno de arco eléctrico en el área de acería de ADELCA**

Marcillo Changoluisa, Henry Fabian

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Petroquímica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Petroquímica

Ph.D Rodríguez Maecker, Roman Nicolay

05 de agosto del 2020



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Modelamiento y optimización de las condiciones de reacción de combustión, del proceso de fusión de acero reciclado, con GLP y aire enriquecido en un horno de arco eléctrico en el área de acería de ADELCA**” fue realizado por el señor **Marcillo Changoluisa, Henry Fabian**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 05 de agosto de 2020



Firmado electrónicamente por:
ROMAN NICOLAY
RODRIGUEZ
MAECKER

Dr. Rer. Nat., Ph.D Rodríguez Maecker, Roman Nicolay

DIRECTOR

C.C.: 1712082120



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

REPOSABILIDAD DE AUTORÍA

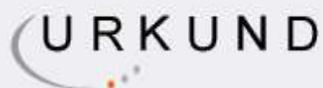
Yo, **Marcillo Changoluisa, Henry Fabian**, con cédula de ciudadanía n° 1722994397, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Modelamiento y optimización de las condiciones de reacción de combustión, del proceso de fusión de acero reciclado, con GLP y aire enriquecido en un horno de arco eléctrico en el área de acería de ADELCA”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 05 de agosto de 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marcillo Changoluisa, Henry Fabian', written over a horizontal line.

Marcillo Changoluisa, Henry Fabian

C.C.: 1722994397



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS - PETROQUIMICA - MARCILLO HENRY.docx (D77336820)
Submitted: 7/31/2020 2:49:00 AM
Submitted By: terasalepou@gmail.com
Significance: 1 %

Sources included in the report:

Trabajo.pdf (D55310522)
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21396638>
<https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/628418/CEM184383.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
https://www.researchgate.net/profile/Alberto_Mendoza4/publication/236611679_Analisis_de_la_generacion_de_NOx_en_una_caldera_mediante_tecnicas_de_dinamica_de_fluidos_computacional/links/0c960518426a5c421b000000/Analisis-de-la-generacion-de-NOx-en-una-caldera-mediante-tecnicas-de-dinamica-de-fluidos-computacional.pdf

Instances where selected sources appear:

4

Revisado





DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Marcillo Changoluisa, Henry Fabian**, con cédula de ciudadanía n° 1722994397, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Modelamiento y optimización de las condiciones de reacción de combustión, del proceso de fusión de acero reciclado, con GLP y aire enriquecido en un horno de arco eléctrico en el área de acería de ADELCA”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 05 de agosto de 2020

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Marcillo Changoluisa, Henry Fabian', is written over a horizontal line.

Marcillo Changoluisa, Henry Fabian

C.C.: 1722994397

DEDICATORIA

A mi padre Ibán y a mi madre Silvia, mis primeros ejemplos a seguir, que con su ingenio y fortaleza han logrado forjar gran parte de lo que soy.

A mis hermanos; Diana, Maricela y Alexis, que influyen hasta el día de hoy en cada uno de mis pasos.

A mis sobrinos Micaela y John, siempre estaré apoyándolos como sus madres lo hicieron conmigo.

A mis tíos, en especial a Fabian, espero que este pequeño logro sea un homenaje al gran apoyo brindado.

Henry Marcillo

AGRADECIMIENTO

A la vida, por darme la oportunidad de aprender algo nuevo cada día, y por hacerme coincidir con las personas correctas.

A mis padres Ibán y Silvia por el esfuerzo constante de sacar a sus cuatro hijos adelante.

Mis más sinceros agradecimientos a la empresa ADELCA por la oportunidad y la confianza entregada, en especial al ingeniero Oscar Orozco, al ingeniero Diego Iguago, y al ingeniero Fabian Criollo, gracias por los conocimientos compartidos.

A mi tutor, Dr. Roman Rodríguez, a quien considero un referente académico y personal desde los inicios de mi carrera, gracias por todo el tiempo y sabiduría brindada.

A mis profesores, a mi prestigiosa Universidad, y a mis grandes amigos; Cristian, Edwin, Alex, David y Willam por su amistad y por darme una mano de apoyo en este camino universitario.

A cada persona que me conoce y me ha regalado sus palabras de aliento, son un eslabón para que este día se encuentren comprendidas en la palabra: GRACIAS.

Henry Marcillo

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA	1
CERTIFICACIÓN	2
REPONSABILIDAD DE AUTORÍA	3
ANÁLISIS URKUND	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTO	7
ÍNDICE DE CONTENIDO	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
ÍNDICE DE FIGURAS	16
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	19
ABREVIATURAS	20
RESUMEN	21
ABSTRACT.....	22
CAPÍTULO I.....	23
1 GENERALIDADES.....	23
1.1 <i>Introducción</i>	<i>23</i>
1.2 <i>Planteamiento del problema</i>	<i>25</i>

1.3	<i>Justificación e importancia</i>	27
1.4	<i>Objetivos</i>	28
1.4.1	Objetivo General	28
1.4.2	Objetivos Específicos	28
CAPÍTULO II		30
2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	30
2.1	<i>Combustión</i>	30
2.2	<i>Propiedades de los combustibles</i>	31
2.2.1	Composición química de los combustibles	31
2.2.2	Poder calorífico y entalpía de combustión	32
2.2.3	Densidad.....	33
2.2.4	Límite de inflamabilidad.....	34
2.2.5	Punto de inflamación o temperatura de ignición	35
2.3	<i>Clasificación de los combustibles</i>	35
2.3.1	Combustibles sólidos	35
2.3.2	Combustibles líquidos	36
2.3.3	Combustibles gaseosos	37
2.4	<i>Gas licuado de petróleo</i>	37
2.5	<i>Aire de combustión y características del oxidante</i>	39
2.6	<i>Propiedades de la combustión</i>	40

	10
2.6.1 Productos de combustión	40
2.6.2 Relación aire-combustible	41
2.6.3 Temperatura de la llama adiabática	42
2.7 Tipos de combustión.....	43
2.7.1 Combustión completa.....	44
2.7.2 Combustión incompleta.....	44
2.7.3 Combustión teórica o estequiométrica	45
2.7.4 Combustión con exceso de aire	45
2.7.5 Combustión con defecto de aire.....	45
2.7.6 Combustión mejorada con oxígeno	46
2.8 Temperatura de precalentamiento de aire y combustible	46
2.9 Leyes termodinámicas	47
2.9.1 Primera ley de la termoquímica	47
2.9.2 Segunda ley de la termodinámica	48
2.10 Modos de transferencia de calor	48
2.10.1 Convección	49
2.10.2 Radiación	50
2.10.3 Conducción	50
2.11 Aplicaciones de combustión industrial con altas temperaturas.....	51
2.11.1 Industria de metales	51

	11
2.11.2	Industria minera.....53
2.11.3	Incineración de desechos.....53
2.12	<i>Sistemas prácticos de combustión</i>54
2.13	<i>CFD y modelado de la combustión por computadora</i>55
2.13.1	Perspectivas.....56
CAPÍTULO III60
3	METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL PROYECTO60
3.1	<i>Análisis situacional</i>60
3.1.1	Descripción general del área de estudio.....60
3.1.2	Descripción del sistema analizado61
3.2	<i>Determinación de los parámetros químicos para la optimización del proceso de combustión</i>63
3.2.1	Especificación de la composición de hidrocarburos del GLP.....63
3.2.2	Determinación de la reacción química de la combustión del GLP63
3.2.3	Optimización de los flujos volumétricos de GLP y aire enriquecido de los perfiles 2 y 3.....64
3.3	<i>Modelamiento y simulación numérica de la combustión</i>68
3.3.1	Elección del software68
3.3.2	Módulos de ejecución.....69
3.3.3	Pre-procesamiento.....71
3.3.4	Procesamiento77

	12
3.3.5 Post-procesamiento	90
3.4 Validación	91
CAPÍTULO IV.....	93
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	93
4.1 <i>Discusión del modelo</i>	93
4.2 <i>Resultados del modelado y la simulación numérica</i>	94
4.2.1 Dominio computacional	94
4.2.2 Ingreso de los gases reactivos	94
4.2.3 Campos de temperaturas	96
4.2.4 Líneas de flujo.....	98
4.2.5 Vectores de velocidad	98
4.2.6 Campos de velocidad.....	99
4.2.7 Distribución de las especies químicas	100
4.3 <i>Validación por visualización del proceso de combustión real (perfil 3)</i>	103
4.4 <i>Discusión de la relación aire combustible propuesta y descripción de la llama generada</i>	105
CAPÍTULO V.....	108
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
5.1 <i>Conclusiones</i>	108
5.2 <i>Recomendaciones</i>	110

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
ANEXOS.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Entalpía de formación, función de Gibbs de formación, entropía absoluta, y poder calórico de diversas sustancias a 298 K y 1 atm.	33
Tabla 2. Límites de inflamabilidad de diversos combustibles gaseosos.	34
Tabla 3. Propiedades del GLP a 16 °C.....	38
Tabla 4. Temperatura de llama adiabática para varios componentes.....	43
Tabla 5. Perfil 2 (Caudales de aire, de GLP, ratio y potencia equivalente).	64
Tabla 6. Perfil 3 (Caudales de aire, de GLP, ratio y potencia equivalente).	65
Tabla 7. Composiciones de los flujos empleados en la combustión dentro del EAF.....	65
Tabla 8. Moles de oxígeno empleados en la combustión de propano y butano.....	66
Tabla 9. Influencia de del oxígeno sobre las moles necesarias para la combustión de GLP.	66
Tabla 10. Flujos de corriente oxidante al 88% V/V de oxígeno ideales para el perfil 2 y 3.	67
Tabla 11. Flujos ideales de GLP en base al caudal de O ₂ especificado para el perfil 2 y 3.	68
Tabla 12. Estadísticas del mallado del dominio de estudio.....	73
Tabla 13. Rangos de oblicuidad y calidad de elemento respectiva.....	76
Tabla 14. Velocidades de los gases respecto al perfil 3.	85
Tabla 15. Perfil propuesto para observar comportamiento de la llama (ratio propuesto).	92

Tabla 16. Perfil empleado para observar el comportamiento de la llama (sin influencia de PC).....	92
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Triángulo de la combustión.</i>	31
Figura 2 <i>Proceso de reacción de combustión de metano en equilibrio adiabático.</i>	41
Figura 3 <i>Composición de gas predicha de especies principales en función de la temperatura de precalentamiento del aire para llamas de aire / CH₄.</i>	47
Figura 4 <i>Transferencia de calor en hornos.</i>	49
Figura 5 <i>Horno de arco eléctrico (EAF) con tres quemadores suplementarios montados en las paredes laterales y disparando entre los tres electrodos.</i>	52
Figura 6 <i>Procesos fundamentales en incineradores de horno rotativo.</i>	54
Figura 7 <i>Proceso general llevado a cabo en una acería.</i>	60
Figura 8 <i>Distribución de los quemadores dentro del EAF.</i>	62
Figura 9 <i>Diagrama del desarrollo metodológico básico de simulación en CFD.</i>	71
Figura 10 <i>Geometría general.</i>	72
Figura 11 <i>Mallado del dominio.</i>	73
Figura 12 <i>Entrada de los gases, pared, y salida (izquierda a derecha).</i>	74
Figura 13 <i>Elementos de calidad de la malla generada.</i>	75
Figura 14 <i>Distribución de los elementos en porcentaje vs. oblicuidad en la malla de estudio.</i>	76

Figura 15 <i>Distribución de los elementos en porcentaje vs. ortogonalidad del mallado de estudio.</i>	77
Figura 16 <i>Parámetros establecidos para el modelo de turbulencia.</i>	82
Figura 17 <i>Establecimiento de las reacciones de combustión. Reacción del propano y reacción del butano (de izquierda a derecha).</i>	83
Figura 18 <i>Principales configuraciones del modelo de combustión del estudio.</i>	84
Figura 19 <i>Velocidad y composición de entrada de GLP.</i>	86
Figura 20 <i>Velocidad y composición de entrada de O₂ (quemador).</i>	86
Figura 21 <i>Velocidad y composición de entrada de O₂ (lanza).</i>	87
Figura 22 <i>Condiciones de salida de los gases.</i>	88
Figura 23 <i>Configuraciones para los métodos de solución del sistema analizado.</i>	88
Figura 24 <i>Parámetros de la ejecución (convergencia) del estudio.</i>	89
Figura 25 <i>Avance de la convergencia del problema.</i>	90
Figura 26 <i>Esquema a seguir para el desarrollo de la simulación.</i>	90
Figura 27 <i>Perfil empleado para la validación visual.</i>	91
Figura 28 <i>Comprobación de las velocidades de ingresos. (a) GLP, (b) O₂ como quemador, (c) O₂ como lanza.</i>	95
Figura 29 <i>Comprobación de la composición de ingreso de los gases reactivos, en relación a su composición (fracción másica). (a) propano, (b) butano, (c) O₂.</i>	96
Figura 30 <i>Campos de temperatura.</i>	97

Figura 31 <i>Líneas de flujo.</i>	98
Figura 32 <i>Vectores de velocidad.</i>	99
Figura 33 <i>Campos global de velocidades.</i>	100
Figura 34 <i>Distribución de las especie químicas reactivas. (a) propano, (b) butano.</i>	101
Figura 35 <i>Distribución del oxígeno.</i>	102
Figura 36 <i>Distribución de los producto. (a) dióxido de carbono, (b) vapor de agua.</i>	102
Figura 37 <i>Llama del proceso real, generada con la relación de 5,5.</i>	104
Figura 38 <i>Resultados generales de la simulación.</i>	105
Figura 39 <i>Llama generada con la relación 5,5 y sin la influencia de la PC.</i>	106
Figura 40 <i>Llama genera por la relación 6,1 (sin flujo en PC).</i>	107

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Entalpía de combustión.	33
Ecuación 2. Límite de inflamabilidad.	35
Ecuación 3. Conversión de relación AF a AF.	41
Ecuación 4. Conservación de entalpías.....	42
Ecuación 5. Ecuación de la conservación de la masa.	79
Ecuación 6. Ecuaciones de la conservación del momento.	79
Ecuación 7. Ecuación de la conservación de la energía.....	79
Ecuación 8. Ecuaciones de transporte para el modelo $k - \varepsilon$ estándar. (a) Determinación de k (b) determinación de ε	81
Ecuación 9. Ecuación de viscosidad turbulenta.....	82

ABREVIATURAS

PC	Perforación Central
EAF	Horno de Arco Eléctrico
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
GLP	Gas Licuado de Petróleo
ASTM	Asociación Americana de Ensayos de Materiales
OEC	Combustión Enriquecida con Oxígeno
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
LI	Límite de Inflamabilidad
AF	Relación Aire Combustible (base másica)
\overline{AF}	Relación Aire Combustible (base molar)
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
RANS	Navier-Stokes con el Promedio de Reynolds (ecuaciones)

RESUMEN

En el presente trabajo se ha determinado la cantidad necesaria de aire enriquecido para generar la combustión completa de GLP, orientados a los perfiles de calentamiento en el proceso de fundición de acero reciclado, llevada a cabo en los quemadores del horno de arco eléctrico de la empresa ADELCA, en el cual se ha tomado consideraciones particulares como la distribución de las perforaciones del quemador y como punto de enfoque, las variables químicas tales como; la composición del GLP y del aire enriquecido. Junto con esto se ha estudiado los principales modelos que permiten, mediante una simulación en el ámbito de la dinámica de fluidos computacional, describir de modo didáctico el fenómeno de combustión, abriendo así un panorama al potencial uso de herramientas virtuales, y en particular a los paquetes de software orientados a la dinámica de fluidos computacionales. La relación determinada en el estudio ha sido puesta en práctica en el horno de arco eléctrico en modo de prueba (sin cargas de acero reciclado). La longitud y el color de la llama han presentado características visualmente superiores a la llama generada por la relación anterior, siendo corroborado por el personal de ADELCA. El estudio ha planteado que la relación óptima para dicha combustión es mayor en 0,6 respecto a la relación aire-combustible manejada en la actualidad por la empresa. La información generada es sustancial para la optimización de los recursos de la empresa.

PALABRAS CLAVE:

- **ENERGÍA QUÍMICA**
- **AIRE ENRIQUECIDO**
- **REACCIÓN DE COMBUSTIÓN DE GLP**
- **DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

ABSTRACT

In the present work the necessary amount of enriched air has been determined to generate the complete LPG combustion, oriented to the heating profiles in the process of casting recycled steel, developed in the burners of the electric arc furnace of the company ADELCA, in which particular considerations have been taken such as the distribution of burner perforations and as a focal point, chemical variables such as; the composition of LPG and enriched air. Together with this, the main models that allow, through a simulation in the domain of computational fluid dynamics, to describe in a didactic way the combustion phenomenon, opening a panorama to the potential use of virtual tools, and in particular to the software packages oriented to the computational fluid dynamics, have been studied. The relationship determined in the study has been put into practice in the electric arc furnace in test mode (without recycled steel charges). The length and color of the flame have presented characteristics visually superior to the flame generated by the previous relationship, being corroborated by ADELCA staff. The study has proposed that the optimal ratio for such combustion is higher by 0,6 with respect to the air-fuel ratio currently handled by the company. The information generated is substantial for the optimization of the company's resources.

KEYWORDS:

- **CHEMICAL ENERGY**
- **ENRICHED AIR**
- **LPG COMBUSTION REACTION**
- **COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Introducción

El reciclaje de distintos materiales se ha extendido de manera considerable en las últimas décadas, y enhorabuena, ya sea para reducir la contaminación medioambiental o para hacer uso de recursos que aún poseen potencial vida útil. Así, el acero reciclado constituye la fuente principal para la producción de materiales o estructuras metálicas empleadas para diversos propósitos. El acero es utilizado en todas las industrias de importancia, tales como; la industria energética, de construcción, automotriz, de infraestructuras, en envasadoras y maquinarias. La producción anual global en 2014 fue de 1660 millones de toneladas de acero bruto en comparación con los aproximadamente 189 millones de toneladas en 1950. La industria del acero es la segunda más grande del mundo, sobrepasada únicamente por la industria del petróleo y de gas, siendo la facturación global de esta industria estimada en 900 mil millones de dólares (Cramb & Amuda, 2016).

El proceso para la obtención de los diferentes tipos de aceros a partir del mineral del hierro es realizado en siderúrgicas integrales, de manera particular, el proceso que parte de material reciclado de acero para la producción de los productos antes mencionados, son llevados a cabo en plantas industriales llamadas acerías, y en cualquiera de los casos, el fenómeno físico característico en este tipo de procesos, es la fundición. Existen diferentes maneras de provocar este fenómeno desarrollado de forma industrial en las unidades denominadas hornos.

En Ecuador, la planta industrial de acería; ADELCA, cuenta con un horno de arco eléctrico, EAF, por sus siglas en inglés *Electric Arc Furnace* (Figura 5) dedicado a la fundición de acero reciclado para la producción de materiales específicos de alta calidad, dirigidos principalmente al ámbito de la construcción. Generalmente un horno de arco eléctrico consta de un crisol o un cuerpo de placa de acero, también denominado hogar, y se encuentra forrado con materiales refractarios. Estos hornos, trabajan con tres electrodos de grafito que son sostenidos por un soporte móvil, cuyo propósito es manipular su altura dentro del horno y controlar el arco eléctrico. Una vez cargado el horno con cantidades específicas de acero reciclado se procede a bajar los electrodos hasta establecer los arcos eléctricos. El calor producido por los arcos eléctricos es el suficiente para que la carga sea fundida (Issouribehere, Agüero, & Battaiotto, 2007).

En 1965 la acería Toshin Steel Co.Ltd de Japón implementó un sistema de quemadores *oxifuel* (oxicombustibles) en hornos de arco eléctrico. El resultado fue una productividad de 2,5 veces mayor a las acerías de Europa. Se implementaron tres quemadores, con keroseno como combustible y se colocaron de tal manera que el dardo de la llama no tenga contacto con los electrodos. Previo a la implementación de los quemadores, el consumo de energía específico era de 500 kWh/t (Guerra & Berciano, 2009).

La implementación de estos quemadores en los EAF produjo un gran interés en diversas industrias y que como consecuencia han empleado distintos combustibles. Por otra parte, el uso de una corriente oxidante como comburente, con un contenido de oxígeno mayor al 21% en volumen, denominada generalmente combustión mejorada con oxígeno, genera mayores beneficios frente a una combustión convencional con aire que incluyen; aumentos de temperatura, eficiencia térmica en los procesos de

calentamiento y fusión industrial, mejoramiento en la estabilidad de la llama y reducciones en la emisión de contaminantes así como la reducción del consumo de combustible (Skeen, Yablonsky, & Axelbaum, 2009). Dichos beneficios han sido demostrados en una variedad de aplicaciones industriales, aprovechando el calor de combustión y las altas temperaturas, como en la fusión de vidrio, hornos de cemento y hornos de recalentamiento de acero (Daood, Nimmo, Edge, & Gibbs, 2011).

La revista *Combustion Science and Technology* en el año de 1988, recopiló catorce artículos relacionados con métodos numéricos para la combustión de flujos prácticos cuyos seis primeros trabajos ilustran formalmente su capacidad para contribuir al proceso de diseño de equipos de combustión industrial. Desde entonces, tanto la tecnología informática digital como el software numérico siguen creciendo de manera acelerada (Dong, 2000).

1.2 Planteamiento del problema

Las discontinuidades térmicas presentes por efectos de puntos fríos, atribuidas a la unión de dos corrientes metálicas líquidas cercanas al punto de solidificación, se considera un defecto común en todos los procesos de fundición (Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008). Algunos de los objetivos del uso de la energía química implementada en un horno de arco es lograr una distribución de temperatura más uniforme, proporcionando calor en dichos puntos fríos y controlando de mejor manera todas las zonas del horno, utilizando eficientemente la energía (Yang & Blasiak, 2006). La energía química del combustible favorece un aceleramiento en la fusión de la carga en el horno de arco eléctrico, al aumento en la productividad, reduce el consumo de energía eléctrica, y por ende el gasto de los electrodos que producen el arco (Coveñas, 2007). El exceso óptimo de aire depende de la concentración de oxígeno, del combustible

usado, del tipo de quemador, del tipo de caldera y el estado en el que se encuentra, y de varios factores más. En realidad e independiente de los controles usados para manejar el exceso de aire, lo que importa es tomar conciencia de la necesidad de una proporción correcta de aire/combustible (Esquerra Pizá, 1988).

En el proceso de fundición de acero reciclado, específicamente realizado con energía química dentro de un horno de arco eléctrico, proporcionada por la reacción de combustión del GLP y aire enriquecido, punto de enfoque del presente trabajo de investigación, son condiciones de operación propias de la empresa, y hace que la combustión eficiente sea un tema de estudio de interés. Debido a que la empresa cuenta con información limitada de este proceso particular de combustión, ADELCA ha buscado determinar las mejores condiciones de operación; como son los flujos correctos o exactos de GLP y aire para el mencionado proceso.

Se conoce que los costos de operación para la producción de aire enriquecido, son elevados y el uso del GLP como combustible representa una fuente de egresos monetarios representativos, por lo que; el combustible o el exceso de aire (oxígeno), cualquiera de ellos sin reaccionar, conlleva un gasto de insumos innecesarios y pérdidas en eficiencia de la energía entregada por la reacción de combustión, los cuales serán reflejados económicamente hacia la empresa. En ese sentido, es necesario establecer la relación oxígeno/combustible ideal, generando una combustión completa mediante la oxidación de todo el combustible y liberando la mayor cantidad de energía posible producida por la reacción para el óptimo desarrollo del proceso de fundición manejado dentro del área de acerías de ADELCA.

1.3 Justificación e importancia

La combustión es uno de los procesos más importantes en ingeniería, conlleva flujos de fluidos turbulentos, transferencia de calor, reacción química entre otros procesos químicos y físicos complejos. Las aplicaciones más comunes de ingeniería involucran motores de combustión interna, calderas, hornos, cámaras de combustión de centrales eléctricas, motores aeronáuticos, cámaras de combustión de turbinas de gas y varios equipos de combustión más (Versteeg et al., 1995).

En este trabajo de investigación se pretende estudiar la reacción de combustión específica llevada a cabo en el área de acería. Tanto el combustible como el comburente presentes en la reacción generada en ADELCA poseen especificaciones particulares, por ende; el proceso de combustión no es el convencional. En una combustión estabilizada, la reacción se desarrolla de forma tal que los reactivos van reaccionando en la misma cantidad con los productos que aparecen, por lo que, si existe un aumento continuo del mismo se presentaría una reacción violenta y masiva con el oxígeno, ocasionando una explosión (Esquerra Pizá, 1988), y junto con ello, una determinación incorrecta de las magnitudes de los flujos de combustible y comburente, conlleva una baja eficiencia en el proceso de combustión y en un gasto innecesario de los reactivos.

La combustión en fase gaseosa despliega fenómenos físico-químicos con fuertes interacciones en la cinética, la difusión de especies y de calor, la termodinámica, y de movimientos convectivos que son inducidos debido a la turbulencia, cuyo comportamiento puede describirse mediante el uso de ecuaciones que derivan de las leyes fundamentales de la conservación de la energía y masa. La combustión puede ser simulada mediante el uso de software CFD, a pesar de tener algunas limitaciones, como

la validación de modelos para un fenómeno determinado, la no linealidad de las ecuaciones, las variaciones de las propiedades de los fluidos, geometrías complejas, tiempos computacionales, entre otros (Múnera, Arrieta, & Sierra, 2009).

La información que se espera obtener de la reacción mediante el correcto desarrollo del estudio, tiene como propósito introducir un plan enfocado en el ahorro de recurso y el mejoramiento de eficiencia del uso de la energía química como coadyuvante en el proceso de fundición de acero en el horno de arco eléctrico dentro del área de acería en ADELCA.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Modelar y optimizar las condiciones de reacción de combustión, del proceso de fusión de acero reciclado, con GLP y aire enriquecido en un horno de arco eléctrico para el proceso de fusión de acero reciclado en el área de acería de ADELCA.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar la composición del GLP empleado como combustible en el proceso de fundición de acero reciclado dentro del área de acería de ADELCA.
- Determinar las ecuaciones químicas llevadas a cabo en la reacción de combustión de GLP con aire enriquecido.
- Determinar teóricamente la relación aire/combustible y proponer las mejor condiciones de reacción tales como el flujo de los gases reactivos en la alimentación para optimizar los recursos empleados dentro proceso de fundición.

- Establecer los modelos fenomenológicos que describan el proceso de combustión, a partir de una revisión bibliográfica de investigaciones similares reportadas, para la realización de una simulación didáctica del fenómeno estudiado.
- Validar parcialmente la simulación de forma experimental mediante imágenes que corroboren el comportamiento de la llama generada en el proceso manejado por ADELCA.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Combustión

Se denomina combustión al conjunto de reacciones de oxidación que conlleva desprendimiento de calor, producido por dos elementos principales: el combustible, que pueden ser sólidos (Madera, etc), líquidos (Jet Fuel, etc) o gases (GLP, etc) y el comburente, oxígeno. Este tipo de reacciones se distingue de otros procesos de oxidación debido a que ocurre de manera rápida y generalmente con presencia y mantenimiento de llamas, no siendo así en procesos de oxidación lenta u oxidación muy rápida (detonaciones, explosiones y deflagraciones) (San José, 2001).

Para que la reacción de combustión se lleve a cabo deben coexistir proporciones adecuadas del combustible y el comburente. Además, es necesaria la presencia de una fuente de energía o fuente de ignición, cuya acción es iniciar y así mantener la combustión. Se denomina triángulo de combustión o de fuego al conjunto de estos tres elementos, de forma gráfica se la puede representar como se muestra en la Figura 1. En detalle, para que suceda la combustión de un combustible, este debe estar en su estado gaseoso, debido a esto los combustibles sólidos y líquidos deben calentarse hasta alcanzar su temperatura de gasificación, en tal punto desprende vapores, y seguir calentándose hasta alcanzar su temperatura de ignición, a la cual inflaman espontáneamente. Un ejemplo es la mezcla gas natural-aire, que logra un autoencendido a una temperatura en el orden de 650-750°C (Barrera, Castello, Betoret, & Pérez, 2018).

Figura 1

Triángulo de la combustión.

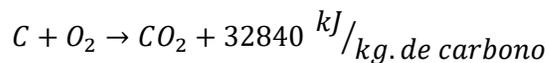


Nota: (Barrera et al., 2018).

2.2 Propiedades de los combustibles

2.2.1 Composición química de los combustibles

Los elementos principales que componen un combustible son: el hidrogeno (H), el carbono (C) y el azufre (S), combinándose con una corriente con el suficiente oxígeno, y una fuente de ignición para producir una reacción, verificándose con un gran desprendimiento de energía en forma de calor y generalmente formando llamas. Las reacciones de combustión que generan los elementos de un combustible y sus calores desprendidos son mostradas a continuación (Mavainsa, 2011).



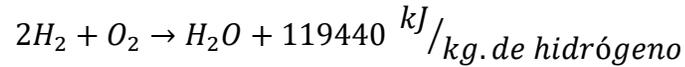
Reacción 1. Combustión del carbono.

Nota: (Mavainsa, 2011).



Reacción 2. Combustión parcial del carbono.

Nota:(Mavainsa, 2011).



Reacción 3. Combustión del hidrógeno.

Nota: (Mavainsa, 2011).



Reacción 4. Combustión del azufre.

Nota: (Mavainsa, 2011).

2.2.2 Poder calorífico y entalpía de combustión

El poder calorífico (PC) de un combustible es el primer criterio que preside a la aprobación de un combustible, y Virella (1961) lo define como la cantidad de calor que se puede obtener de un combustible con la unidad de peso. El PC se establece como un número positivo de magnitud igual a la de la entalpía de combustión. Se puede presentar de dos formas como: El poder calorífico superior (PCS), se obtiene cuando toda el agua formada en la reacción de combustión es líquida. Por el contrario el poder calorífico inferior (PCI), es obtenido cuando toda el agua formada en la reacción de combustión es gas. Los valores de ambos poderes calóricos dependen de la fase del combustible. El poder calorífico superior supera al inferior en la energía necesaria para evaporar el agua en la reacción. La Tabla 1 muestra información acerca de los poderes calóricos de diferentes hidrocarburos (Moran & Shapiro, 2004).

Generalmente la entalpía de combustión (\bar{h}_{comb}), se la define como la diferencia de entalpías de los productos y los reactivos para una combustión completa a una presión y temperatura específica, expresada de la siguiente manera:

$$\bar{h}_{comb} = \sum_P n_s \bar{h}_s - \sum_R n_e \bar{h}_e$$

Ecuación 1. Entalpía de combustión.

Nota: (Moran & Shapiro, 2004).

donde n pertenece a los coeficientes estequiométricos de la reacción y \bar{h} denota la entalpía en base molar (Moran & Shapiro, 2004).

Tabla 1

Entalpía de formación, función de gibbs de formación, entropía absoluta, y poder calórico de diversas sustancias a 298 k y 1 atm.

Sustancia	Fórmula	Masa molar M (kg/kmol)	Entalpía de formación, \bar{h}_f° (kJ/kmol)	Función de Gibbs de formación, \bar{g}_f° (kJ/kmol)	Entropía absoluta, \bar{s}° (kJ/kmol · K)	Poder calorífico	
						Superior (kJ/kg)	Inferior (kJ/kg)
Carbono	C(s)	12,01	0	0	5,74	32 770	32 770
Hidrógeno	H ₂ (g)	2,016	0	0	130,57	141 780	119 950
Nitrógeno	N ₂ (g)	28,01	0	0	191,50	—	—
Oxígeno	O ₂ (g)	32,00	0	0	205,03	—	—
Monóxido de carbono	CO(g)	28,01	-110 530	-137 150	197,54	—	—
Dióxido de carbono	CO ₂ (g)	44,01	-393 520	-394 380	213,69	—	—
Agua	H ₂ O(g)	18,02	-241 820	-228 590	188,72	—	—
Agua	H ₂ O(l)	18,02	-285 830	-237 180	69,95	—	—
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂ (g)	34,02	-136 310	-105 600	232,63	—	—
Amoníaco	NH ₃ (g)	17,03	-46 190	-16 590	192,33	—	—
Oxígeno	O(g)	16,00	249 170	231 770	160,95	—	—
Hidrógeno	H(g)	1,008	218 000	203 290	114,61	—	—
Nitrógeno	N(g)	14,01	472 680	455 510	153,19	—	—
Grupo oxhidrilo	OH(g)	17,01	39 460	34 280	183,75	—	—
Metano	CH ₄ (g)	16,04	-74 850	-50 790	186,16	55 510	50 020
Acetileno	C ₂ H ₂ (g)	26,04	226 730	209 170	200,85	49 910	48 220
Etileno	C ₂ H ₄ (g)	28,05	52 280	68 120	219,83	50 300	47 160
Etano	C ₂ H ₆ (g)	30,07	-84 680	-32 890	229,49	51 870	47 480
Propileno	C ₃ H ₆ (g)	42,08	20 410	62 720	266,94	48 920	45 780
Propano	C ₃ H ₈ (g)	44,09	-103 850	-23 490	269,91	50 350	46 360
Butano	C ₄ H ₁₀ (g)	58,12	-126 150	-15 710	310,03	49 500	45 720
Pentano	C ₅ H ₁₂ (g)	72,15	-146 440	-8 200	348,40	49 010	45 350
Octano	C ₈ H ₁₈ (g)	114,22	-208 450	17 320	463,67	48 260	44 790
Octano	C ₈ H ₁₈ (l)	114,22	-249 910	6 610	360,79	47 900	44 430
Benceno	C ₆ H ₆ (g)	78,11	82 930	129 660	269,20	42 270	40 580
Metanol	CH ₃ OH(g)	32,04	-200 890	-162 140	239,70	23 850	21 110
Metanol	CH ₃ OH(l)	32,04	-238 810	-166 290	126,80	22 670	19 920
Etanol	C ₂ H ₅ OH(g)	46,07	-235 310	-168 570	282,59	30 590	27 720
Etanol	C ₂ H ₅ OH(l)	46,07	-277 690	174 890	160,70	29 670	26 800

Nota: (Moran & Shapiro, 2004).

2.2.3 Densidad

La densidad del gas, nos ayuda a calcular parámetros como el número de Reynolds, que suele ser usado para determinar el coeficiente de transferencia de calor

por convección. Asimismo es usada para calcular la velocidad media del gas de a través de la cámara de combustión, que generalmente también necesita el cálculo de coeficiente de convección. La densidad del gas es inversamente proporcional a la temperatura del gas, así, a medida que aumenta la temperatura, la densidad de este disminuye (Charles & Baukal, 2000).

2.2.4 Límite de inflamabilidad

Es una propiedad que de suma importancia en los combustibles gaseosos y establece la proporción de aire y gas preciso para que se promueva el proceso de combustión, mediante límites inferiores y superiores. Los gases que muestran mayor inflamabilidad son el acetileno (C_2H_2) y el hidrógeno. La Tabla 2 muestra los límites de inflamabilidad de algunos gases combustibles (Brizuela & Romano, 2003).

Tabla 2

Límites de inflamabilidad de diversos combustibles gaseosos.

Gases Fórmula (nombre)	Límites de inflamabilidad	
	Inferior (% vol/ vol)	Superior (% vol/ vol)
H ₂	4.0	75.0
CH ₄	5.0	15.0
C ₂ H ₆	3.2	12.45
C ₃ H ₈	2.4	9.5
<i>i</i> C ₄ H ₁₀	1.8	8.4
<i>n</i> C ₄ H ₁₀	1.9	8.4
C ₅ H ₁₂ (Pentano)	1.4	7.8
C ₆ H ₁₄ (Hexano)	1.25	6.9
C ₇ H ₁₆ (Heptano)	1.0	6.0
C ₂ H ₄ (Etileno)	3.05	28.6
C ₃ H ₆ (Propileno)	2.0	11.1
C ₄ H ₆ (Butadieno)	2.0	11.5
C ₂ H ₂ (Acetileno)	2.5	81.0
C ₆ H ₆ (Benceno)	1.4	6.75
CO	12.5	74.2
NH ₃	15.5	27.0
SH ₂	4.3	45.5

Nota: (Brizuela & Romano, 2003).

Los límites de inflamación de una mezcla gaseosa pueden ser determinados de la siguiente manera:

$$L = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L_i}}$$

Ecuación 2. Límite de inflamabilidad.

Nota: (Brizuela & Romano, 2003).

donde L_i es el límite de inflamabilidad del componente i y x_i es la fracción molar de dicho componente (Brizuela & Romano, 2003).

2.2.5 Punto de inflamación o temperatura de ignición

Uno de los principales condiciones para que la mezcla comburente combustible logre llevar a cabo la reacción de combustión es alcanzar la temperatura de ignición o el punto de inflamación, refiriéndose a la temperatura mínima necesaria para que la mezcla combustione. Una vez logrado dicho punto o alcanzada dicha temperatura, la energía producida por la reacción mantendrá una temperatura por encima de la de ignición y el proceso finalizará cuando el combustible o el comburente se termine (Brizuela & Romano, 2003).

2.3 Clasificación de los combustibles

2.3.1 Combustibles sólidos

Su origen generalmente es orgánico o proveniente de residuos de los procesos de refinamiento de crudo de petróleo. Entre los combustibles sólidos más importantes, Francis & Peters (2013) citan:

- Naturales
 - Madera

- Turba
- Lignito
- Carbones duros que van desde carbones bituminosos hasta antracitas
- Artificial
 - Carbón de madera y de turba
 - Briquetas y coque de lignito
 - Briquetas de carbón carbonizadas y sin carbonizar
 - Coque de baja media y alta temperatura

2.3.2 Combustibles líquidos

Son combustibles mayormente artificiales, producidos por refinerías (derivados del petróleo), siendo los combustibles predilectos y esenciales para el desarrollo industrial. Los combustibles líquidos más comunes según Francis & Peters (2013) son:

- Naturales
 - Líquidos petrolíferos
- Artificiales
 - Nafta (gasolina)
 - Queroseno
 - Aceites residuales
 - Combustibles de alquitrán de hulla
 - Combustibles líquidos derivados del carbón

2.3.3 Combustibles gaseosos

Son de volumen y de forma variables, estos ejercen presión en todas las paredes del recipiente que lo contenga debido a que las fuerzas que originan los movimientos moleculares son sumamente superiores a las fuerzas de atracción entre moléculas. Estos combustibles poseen un precio competitivo y bastante estable, por lo contrario de los combustibles líquidos derivados del petróleo. Un combustible muy conocido por ser uno de los menos contaminantes es el gas natural ya que en su composición no se encuentra azufre, produce un 57% menos de CO_2 que el carbón y un 34% menos que el gasóleo pero en su contra se encuentra que el gas natural produce H_2O en valores máximos disminuyendo notablemente la cantidad de energía desprendida por unidad de gas natural, en comparación con el obtenido al usar los Gases Licuados de Petróleo (Barrera et al., 2018).

2.4 Gas licuado de petróleo

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) por sus siglas en inglés *Occupational Safety and Health Administration* (1993) define al GLP como cualquier material que esté compuesto predominantemente por cualquiera de los siguiente hidrocarburos, o mezcla de ellos; propano, butanos (butano o normal isobutano), propileno y butilenos y se lo obtiene del procesamiento de refinación del petróleo. Algunas de las propiedades del GLP son mostradas en la Tabla 3.

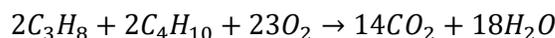
Tabla 3

Propiedades del GLP a 16 °C.

PROPIEDAD	PROPANO	BUTANO	MEZCLA
Fórmula	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈ /C ₄ H ₁₀
Punto inicial de ebullición	-46	-9	-42
Gravedad específica del líquido (kg/l)	0,509	0,582	0,531
Gravedad específica del vapor (aire=1,0)	1,52	2,01	1,67
Poder calorífico (kJ/m ³)	72 732	95 776	50 065

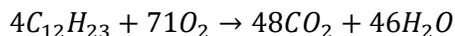
Nota: (Suárez, 2013).

En teoría el GLP emite “estequiométricamente” una menor cantidad de dióxido de carbono al reaccionar, en relación a otro tipo de combustibles, debido a que existe menor cantidad de átomos de carbono por molécula. Así por ejemplo, la ecuación estequiométrica de la reacción de combustión del GLP con oxígeno genera 14 moles de dióxido de carbono. Mientras que en el proceso de combustión de diésel se obtienen 48 moles de dióxido de carbono, esto se puede verificar de la siguiente manera (Suárez, 2013):



Reacción 5. Reacción de combustión de GLP.

Nota: (Suárez, 2013).



Reacción 6. Reacción de combustión de diésel.

Nota: (Suárez, 2013).

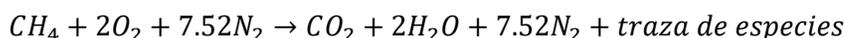
El GLP no es considerado tóxico, sin embargo produce una acción fisiológica sobre el organismo debido a su inhalación, produciendo efecto de tipo analgésico, por lo que, puede producir asfixia a individuos que se encuentren en un lugar saturado de GLP. En cuanto a su densidad y su viscosidad se refiere, el GLP posee,

numéricamente, valores mayores que el aire, por lo que, se lo considera más pesado, debido a eso, si una nube de GLP afluye en un lugar confinado, este tenderá a mantenerse a nivel del suelo (Suárez, 2013). Una práctica de seguridad hace que el azufre como mercaptanos sea adicionado en la mezcla de GLP, cuya función es la de proporcionar un olor característico y así detectar cualquier fuga.

2.5 Aire de combustión y características del oxidante

El aire, generalmente suministro principal en un proceso de combustión, es calificado como comburente debido a su composición. Para lograr una combustión completa se debe asegurar que el aire contenga el suficiente oxígeno para llevar a cabo la reacción. Para conocer la cantidad de aire que se debe suministrar es menester analizar la reacción y su estequiometría.

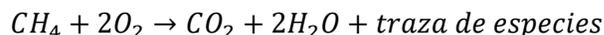
Existen diversos procesos de combustión a alta temperatura que utilizan un oxidante que contiene una mayor proporción de oxígeno que el 21% (en volumen) que se encuentra en el aire atmosférico normal. Esto se conoce como combustión mejorada o enriquecida con oxígeno (OEC) por sus siglas en inglés *Oxygen Enriched Combustion* y tiene considerables beneficios, que incluyen una mayor productividad y eficiencia térmica al tiempo que reduce el volumen de gases de escape y las emisiones de contaminantes. A continuación se presenta la reacción química global simplificada para la combustión estequiométrica de metano con aire como corriente oxidante (Charles & Baukal, 2000):



Reacción 7. Reacción de combustión de metano con aire.

Nota: (Charles & Baukal, 2000).

La cual es comparada frente a la reacción donde la corriente oxidante se encuentra puro:



Reacción 8. Reacción de combustión de metano con oxígeno.

Nota: (Charles & Baukal, 2000).

Es evidente que el volumen de los gases de escape se reduce significativamente por la eliminación de N_2 . El N_2 contenido en el aire actúa como un lastre que puede inhibir el proceso de combustión y tener consecuencias negativas. Los beneficios del uso de la combustión mejorada con oxígeno deben sopesarse con el costo adicional del oxidante, que en el caso del aire es esencialmente gratuito, excepto por el menor costo del equipo de manejo de aire y la potencia del soplador. El uso de un oxidante de mayor pureza tiene muchas consecuencias con respecto a la transferencia de calor desde la llama (Charles & Baukal, 2000).

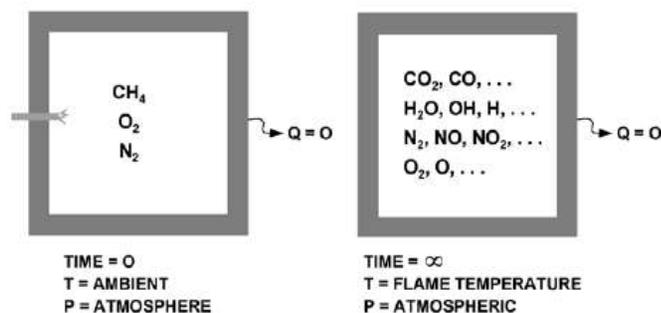
2.6 Propiedades de la combustión

2.6.1 Productos de combustión

La composición real de los productos de escape de la reacción de combustión depende de varios factores, incluida la composición oxidante, la temperatura de los gases y la relación de equivalencia. En la Figura 2 se muestra una representación que muestra una reacción de combustión en equilibrio adiabático (Charles & Baukal, 2000).

Figura 2

Proceso de reacción de combustión de metano en equilibrio adiabático.



Nota: (Charles & Baukal, 2000).

2.6.2 Relación aire-combustible

Dos parámetros que se utilizan con frecuencia para cuantificar las cantidades de combustible y aire en un proceso de combustión particular son la relación aire-combustible AF , y su relación recíproca, la relación combustible-aire. La relación aire-combustible es simplemente la relación de la cantidad de aire con respecto a la cantidad de combustible presente en una reacción. La relación se puede escribir en base molar o másica. La conversión entre estos valores se realiza utilizando los pesos moleculares del aire M_{aire} , y del combustible $M_{combustible}$ (Moran & Shapiro, 2008):

$$\frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}} = \frac{\text{moles de aire} \times M_{aire}}{\text{moles de combustible} \times M_{combustible}}$$

$$= \frac{\text{moles de aire}}{\text{moles de combustible}} \left(\frac{M_{aire}}{M_{combustible}} \right)$$

$$AF = \overline{AF} \left(\frac{M_{aire}}{M_{combustible}} \right)$$

Ecuación 3. Conversión de relación \overline{AF} a AF .

Nota: (Moran & Shapiro, 2008).

donde AF es la relación aire combustible en base másica y \overline{AF} en base molar.

Dado que AF es una relación, tiene el mismo valor si las cantidades de aire y combustible expresadas en unidades SI o unidades Inglesas.

2.6.3 Temperatura de la llama adiabática

En un sistema donde se lleva a cabo una reacción de combustión en ausencia de cualquier interacción de trabajo y cambios de energía cinética y potencial, la energía generada por esta reacción se pierde como calor hacia el medio circundante o usado internamente para aumentar la temperatura de los productos de combustión. Cuando la pérdida de calor es menor, mayor es el aumento de temperatura. La máxima temperatura que pueden alcanzar los productos se da en el caso límite en el que no existe pérdidas de calor hacia el medio circundante ($Q = 0$), a dicha temperatura se la ha denominado temperatura de llama adiabática o temperatura de combustión adiabática (Çengel & Boles, 2012).

Como se mencionó, se establece en un proceso de combustión estacionario que $Q = 0$ y $W = 0$. La temperatura de llama adiabática se puede determinar empleando los principios de conservación de masa y energía, así (Moran & Shapiro, 2004):

$$H_{prod} = H_{react}$$

$$\sum N_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_P = \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r$$

Ecuación 4. Conservación de entalpías.

Nota: (Moran & Shapiro, 2004).

En combustores, la temperatura más alta a la que un material puede exponerse está delimitada por parámetros metalúrgicos. Los valores calculados de las

temperaturas de llama adiabática son bastante altos con respecto a los experimentales, debido a que la combustión puede desarrollarse de manera incompleta. La temperatura de llama adiabática de un combustible específico es variable y va a depender de factores como el estado de los reactivos, su composición, el grado de desarrollo de la reacción y la cantidad de oxidante (oxígeno) (Çengel & Boles, 2009). Algunos valores de temperatura de llama adiabática para diversos combustibles se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4

Temperatura de llama adiabática para varios componentes.

Fuel	Air		O ₂	
	°F	K	°F	K
H ₂	3807	2370	5082	3079
CH ₄	3542	2223	5036	3053
C ₂ H ₂	4104	2535	5556	3342
C ₂ H ₄	3790	2361	5256	3175
C ₂ H ₆	3607	2259	5095	3086
C ₃ H ₆	4725	2334	5203	3138
C ₃ H ₈	3610	2261	5112	3095
C ₄ H ₁₀	3583	2246	5121	3100
CO	3826	2381	4901	2978

Nota: (Charles & Baukal, 2000).

2.7 Tipos de combustión

Las reacciones de combustión están regidas por la estequiometría, que es el estudio las relaciones volumétricas o másicas entre reactivos y productos. Los principales aspectos a determinar son:

- Aire necesario para la combustión.
- Los productos de combustión y sus composiciones.

2.7.1 Combustión completa

Se trata de una reacción de oxidación total y de todos los elementos constituyentes del combustible hidrocarburos (San José, 2001):

- Hidrógeno $H \rightarrow H_2O$
- Azufre $S \rightarrow SO_2$
- Nitrógeno $N \rightarrow NO_x$

Si bien el nitrógeno es considerado como una sustancia inerte, a altas temperaturas pueden llegar a oxidarse y llegar a formar pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno, en el orden de 0.01% (San José, 2001).

2.7.2 Combustión incompleta

En este tipo de combustión la reacción se produce con un defecto de oxígeno, cuando el aporte de aire es menor al necesario para quemar el combustible por completo, esto no necesariamente significa que no exista el suficiente agente oxidante, ya que puede suceder que incluso cuando existe una cantidad excedente de oxidante estequiométrico la reacción se lleve de manera incompleta. La principal atribución de este defecto se da debido a un deficiente contacto entre el oxígeno y el combustible. Debido a esto, el monóxido de carbono tendrá más peso en este proceso, es decir favorecerá a la formación de CO , compuesto gaseoso considerado altamente tóxico. Adicionalmente, presenta consecuencias negativas en la eficiencia del combustible ya que existen cantidades del mismo sin reaccionar y genera humos en exceso (Entrena González, 2013).

2.7.3 Combustión teórica o estequiométrica

El aire suministrado en el proceso de combustión es el justo para quemar una cantidad específica de combustible (sin exceso ni defecto) (Entrena González, 2013). Es el tipo de combustión que se espera en cualquier proceso de combustión industrial, ya que el aprovechamiento de los reactivos es el óptimo.

2.7.4 Combustión con exceso de aire

Es la combustión más común cuyo objetivo es quemar todo el combustible y lograr una combustión completa. Además de esto la combustión con exceso de aire es manejada en proceso en los en los que importa controlar la temperatura en un combustor. Se define exceso de aire a la cantidad del aire que supera la cantidad estequiométrica en una reacción de combustión y se la representa comúnmente en forma de porcentaje tomando como base de 100% el aire estequiométrico, es decir una combustión con 20% de exceso de aire equivale a 120% de aire estequiométrico (Çengel & Boles, 2009).

2.7.5 Combustión con defecto de aire

Por el contrario a la combustión con exceso de aire, la combustión con una menor cantidad de aire estequiométrico se denomina; combustión con deficiencia de aire y de igual manera se representa con valores porcentuales menores al 100% de aire teórico. Por ejemplo un déficit de 20% equivale a una combustión con 80% de aire teórico (Çengel & Boles, 2009).

2.7.6 Combustión mejorada con oxígeno

Este tipo de combustión se basa en el enriquecimiento de aire con oxígeno, es decir el uso de concentraciones elevadas de oxígeno (mayores al 21% en volumen) en la corriente del oxidante. Al eliminar o reducir el N_2 , se pueden obtener muchos beneficios. Estos beneficios sobre la combustión de aire convencional se han demostrado en una variedad de aplicaciones de combustión industrial a alta temperatura, tales como la fusión de vidrio, hornos de cemento y hornos de recalentamiento de acero. La OEC ha aumentado significativamente la eficiencia térmica, ha reducido las emisiones de contaminantes y el consumo de combustible, y ha mejorado la estabilidad de la llama en los sectores industriales mencionados anteriormente. Los hallazgos anteriores sobre el uso de OEC han demostrado un aumento significativo en la tasa de producción del proceso (15-30% comúnmente alcanzado en la industria del vidrio, 5-34% en la industria de metales ferrosos y 65% en hornos rotativos de aluminio) y en eficiencia del combustible (10–30% para hornos de vidrio regenerativos típicos y 28.4% de ahorro de combustible gaseoso en hornos rotativos de aluminio) (Daood et al., 2011).

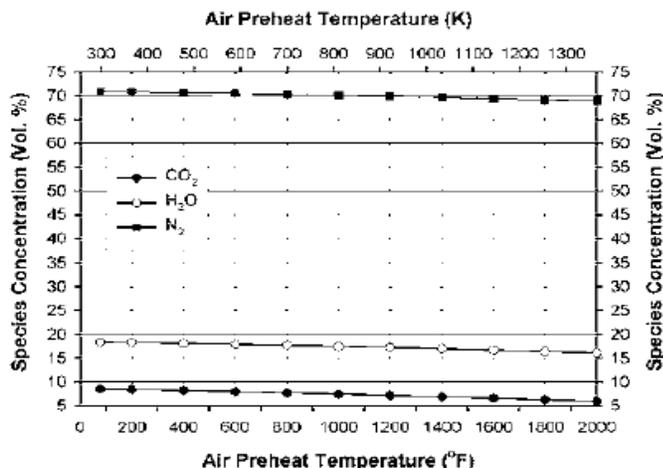
2.8 Temperatura de precalentamiento de aire y combustible

En muchos procesos de combustión industrial, el calor se recupera para mejorar la eficiencia térmica general del proceso y reducir los costos operativos. El calor recuperado se usa más comúnmente para precalentar el aire de combustión entrante y a veces se usa para precalentar el combustible entrante. El precalentamiento del aire o del combustible afecta la composición de los productos de combustión. La Figura 3 muestra las principales especies predichas para la combustión de aire y CH_4 donde el

aire se precalienta hasta los 2000 °F (1366 K). El CO_2 , H_2O y N_2 disminuyen con el precalentamiento del aire, debido a la disociación química (Charles & Baukal, 2000).

Figura 3

Composición de gas predicha de especies principales en función de la temperatura de precalentamiento del aire para llamas de aire / CH_4 .



Nota: (Charles & Baukal, 2000).

2.9 Leyes termodinámicas

El estudio de la energía asociada con las fuerzas de enlace atómico y nuclear son de gran interés para los químicos y son estudiados por parte de los principios termodinámicos permitiendo relacionar los cambios entre estas y otras formas de energía, correspondiente a un sistema, con interacciones energéticas, dentro de las fronteras del mismo.

2.9.1 Primera ley de la termoquímica

La primera ley de la termodinámica, abarca un campo de estudio bastante extenso. Esta ley se fundamenta en el principio de la conservación de la energía. Lo

que significa que para una cantidad de una forma de energía establecida que desaparece otra surge, en igual cantidad de la desaparecida (Maron & Prutton, 1993).

2.9.2 Segunda ley de la termodinámica

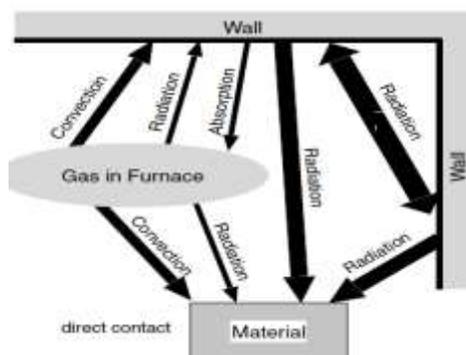
Esta ley enuncia el sentido o la dirección de la transferencia de energía en forma de calor, de manera que la transmisión de calor se da desde un cuerpo con mayor temperatura hacia otro u otros de menor temperatura (Suárez, 2013). El segundo principio de la termodinámica provee una línea a seguir en cuanto a la conversión eficiente de energía térmica en trabajo, proporcionando los medios para medir la degradación de la energía y su calidad (Wark & Donald, 2001).

2.10 Modos de transferencia de calor

Cuando se ponen en contacto sistemas con diferentes temperaturas o en sistemas que presentan un gradiente de temperatura, siempre existirá una transferencia de energía, o comúnmente denominado como transferencia de calor (Kreith, Manglik, & Bohn, 2011). La transferencia de calor en un horno industrial convencional se puede describir en el esquema mostrado en la Figura 4 (Tsuji, Gupta, Hasegawa, Kishimoto, & Morita, 2003).

Figura 4

Transferencia de calor en hornos.



Nota: (Tsuji et al., 2003).

2.10.1 Convección

Kreith et al. (2011), manifiestan que la transferencia de calor por convección radica, en realidad, en dos mecanismos desarrollados simultáneamente. Se analiza primero la transferencia de energía producida por el movimiento de las moléculas (modo conductivo). Yuxtapuesta a esta, se encuentra la transferencia de energía producida por el movimiento macroscópico de las fracciones fluidas. El movimiento de las fracciones fluidas, da como resultado el movimiento del fluido, dicho movimiento es generada por acción de fuerzas externas, como por ejemplo una diferencia de presiones producida por un ventilador o el resultado de un gradiente de densidad, tal como en la convección natural. A la convección se la puede clasificar generalmente como (Charles & Baukal, 2000):

- **Convección forzada.**- La transferencia de calor por convección forzada ocurre cuando un fluido es dirigido con fuerza hacia o sobre un medio (líquido o sólido).
- **Convección natural.**- La convección natural a veces se denomina flujo inducido por flotabilidad. Existen dos situaciones comunes en las que la transferencia de calor por convección natural puede ser importante en los sistemas de

combustión industrial. El primero es transferir calor desde la llama en un sistema donde las velocidades del gas son muy bajas. El segundo es transferir calor desde el exterior de una cámara de combustión al medio ambiente.

2.10.2 Radiación

La radiación térmica es uno de los mecanismos de transferencia de calor más importantes en los hornos industriales. La radiación es un método único de transferencia de calor, ya que no se requiere medio para el transporte de energía; puede transmitirse a través de un vacío o un medio. La radiación es simplemente la transmisión de energía por ondas electromagnéticas, que se caracterizan por su longitud de onda o frecuencia (Charles & Baukal, 2000).

En el calentamiento por combustión industrial, el tipo de radiación más importante es el infrarrojo. Los nervios ópticos humanos son sensibles a la radiación en las longitudes de onda de 0,38 a 0,76 μm , lo que significa que se puede ver radiación en esa banda. En términos prácticos, uno no puede ver la radiación térmica de los cuerpos a temperaturas inferiores a aproximadamente 900 ° F (500 ° C) (Charles & Baukal, 2000).

2.10.3 Conducción

De una manera práctica se puede pensar en la conducción como la forma de transferencia de energía de partículas con mayor energía hacia partículas adyacentes con menor energía por interacción entre ellas. La razón de transferencia de energía por conducción, de manera macroscópica, es calculada por la ley de Fourier (Moran & Shapiro, 2004).

2.11 Aplicaciones de combustión industrial con altas temperaturas

Las aplicaciones con altas temperaturas es algo relativo, Charles & Baukal (2000) considera a los procesos con temperaturas de horno superiores a aproximadamente 2200 °F (1200 °C). Las principales aplicaciones consideradas incluyen hornos y cámaras de combustión utilizadas en las industrias de metales, minerales e incineración de desechos. En general, el mecanismo dominante de transferencia de calor en las industrias posteriormente particularizadas, es la radiación térmica.

2.11.1 Industria de metales

El calentamiento y la fusión del metal han existido durante siglos. Muchas de las técnicas que todavía se usan hoy en día se desarrollaron hace años y a menudo se modifican poco. Como es habitual, la industria de los metales se ha dividido en dos categorías: ferrosas y no ferrosas. La industria ferrosa incluye la fabricación de hierro y acero. La industria no ferrosa incluye esencialmente todos los demás metales, pero los más comunes incluyen aluminio, latón, cobre y plomo (Tsuji et al., 2003).

2.11.1.1 Horno de arco eléctrico

El horno de arco eléctrico se concibió como una unidad para fundir chatarra de acero y reciclar las unidades de hierro para un servicio útil. No depende de un alto horno, sino que la chatarra sólida se funde por el aporte de energía de los arcos eléctricos que pasan entre tres electrodos de carbono. Originalmente, este horno fue concebido como un fusor totalmente eléctrico. Debido a los requisitos de temperatura muy alta en la mayoría de los procesos de metales ferrosos, los quemadores de oxígeno-combustible se han convertido en equipos estándar en la mayoría de los EAF.

Inicialmente, disparando a través de la puerta de escoria, se introdujeron quemadores de oxígeno-combustible para aumentar la fusión de la chatarra. Más tarde, para apuntar de manera eficiente a los puntos fríos en el EAF, asociados con los espacios entre los electrodos. La Figura 5 muestra un diseño de un sistema suplementario de tres quemadores disparado por pared entre los electrodos. Los quemadores proporcionan energía económica para derretir chatarra a menor costo, además de contribuir mejoras en la productividad (entre el 5% al 20%) (Charles & Baukal, 2000).

Figura 5 *Horno de arco eléctrico (EAF) con tres quemadores suplementarios montados en las paredes laterales y disparando entre los tres electrodos.*

Horno de arco eléctrico (EAF) con tres quemadores suplementarios montados en las paredes laterales y disparando entre los tres electrodos.



Nota: (Charles & Baukal, 2000).

La transferencia de calor de los quemadores de oxígeno-combustible a la chatarra se produce por convección forzada de los productos de combustión a y por radiación de la llama. Dado que la transferencia de calor depende de la diferencia de temperatura entre la chatarra y la fuente de calor (gases de combustión y llama), los quemadores de oxígeno-combustible son más efectivos inmediatamente después de que se haya agregado una nueva carga fría al EAF. También existe una conducción térmica entre las piezas de chatarra. La eficiencia disminuye con el tiempo en la fusión y

es el resultado de la reducción en la transferencia de calor a medida que aumenta la temperatura de la chatarra (Charles & Baukal, 2000).

2.11.1.2 Precalentamiento de hornos-cuchara

El horno-cuchara es un dispositivo de almacenamiento del acero fundido dedicado al afino y transporte, de este hacia diferentes partes de una industria. En este tipo de procesos, los quemadores son usados para minimizar el efecto de enfriamiento sobre el metal fundido. Una cuchara fría podría enfriar el metal líquido lo suficiente como para hacer que el metal se solidifique dentro de la cuchara. Minimiza el choque térmico en el material refractario, elimina humedad del recipiente generando menores costos de mantenimiento, mayor productividad y calidad en la fundición (Charles & Baukal, 2000).

2.11.2 Industria minera

La producción de minerales en las que se hace uso de altas temperaturas generadas por el proceso de combustión, abarca una amplia gama de materiales, que incluyen vidrio, cemento, cal, ladrillos, cerámica y refractarios

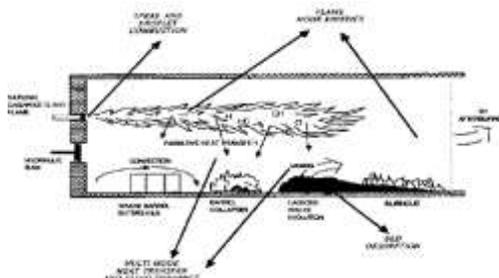
2.11.3 Incineración de desechos

Procesos propuestos por organismos como la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, ASME, por sus siglas en inglés *The American Society of Mechanical Engineers* hacen público guías generales para la combustión en incineración de desechos, debido al requerimiento de altas temperaturas generales comúnmente por combustibles de hidrocarburos como el gas natural. Los incineradores están diseñados para quemar y en mucho de los casos destruir materiales de desecho

que a veces están contaminados con sustancias peligrosas. Un proceso de incineración de desechos se puede observar en la Figura 6 (Charles & Baukal, 2000).

Figura 6

Procesos fundamentales en incineradores de horno rotativo.



Nota: (Charles & Baukal, 2000).

2.12 Sistemas prácticos de combustión

Entre los quemadores más comunes que se manejan en industrias o en la vida cotidiana se encuentran (Brizuela & Romano, 2003):

- **Quemador de gas:** Es un tipo de quemador Bunsen común, cuya flama es estabilizada en una tobera, usada domestica e industrialmente.
- **Quemadores con rotación:** Una variedad de quemadores de caldera y hornos, generan flamas estabilizadas por rotación. El aire forzado por un soplador concibe un movimiento circular que sirve para estabilizar un área de recirculación toroidal en el foco del vórtice.
- **Motores de combustión interna:** Son los sistemas quizá más conocidos, en los que una flama de gran grado de turbulencia avanza siguiendo la mezcla aire-combustible.

- **Turbina de gas:** En estos sistemas el combustible quema en una cuarta parte de aire, después el resto de aire es agregado para diluir los gases de combustión, reduciendo así la temperatura requerida por la turbina.
- **Horno industrial:** Genera una flama luminosa y larga capaz de proporcionar el calor preciso para diferentes propósitos en los que este se emplee. La transferencia de calor en este tipo de quemadores generalmente se da por convección y por radiación
- **Caldera a polvo de carbón:** En este dispositivo el carbón es inyectado de forma pulverizado a través de una corriente de aire. Los compuestos volátiles se pirolizan cerca del punto de inyección produciendo una flama no estabilizada.

2.13 CFD y modelado de la combustión por computadora

La dinámica de fluidos computacional es el análisis de sistemas que involucra la transferencia de calor, el flujo de fluidos además de fenómenos asociados como reacciones químicas, desarrollados mediante la simulación basada en computadora. Los análisis abarcan una amplia gama de áreas de aplicación industrial y no industrial como por ejemplo (Versteeg et al., 1995):

- Aerodinámica de aviones y vehículos.
- Hidrodinámica de barcos.
- En centrales eléctricas: combustión en motores de combustión interna y turbinas de gas.
- Ingeniería ambiental: distribución de contaminantes y efluente.
- Diseño de motores de combustión interna, cámaras de combustión de turbinas de gas y hornos, entre varios más.

2.13.1 Perspectivas

Son varias las consideraciones que se deben tener en cuenta para desarrollar completa y correctamente un modelado. Las más importantes se dan a conocer brevemente a continuación (Charles & Baukal, 2000):

2.13.1.1 Fluidos dinámicos

Existe una variedad de métodos disponibles para simular el flujo de fluidos en un sistema de combustión. Los flujos de fluidos turbulentos generalmente son modelados por las ecuaciones de Navier-Stokes, que son considerados como un modelo "exacto". Para sistemas de interés prácticos, estas ecuaciones son demasiadas complicadas de resolverlas de manera exacta, analítica o numéricamente. Charles & Baukal (2000) sugieren diferentes tipos de aproximaciones para resolverlas.

2.13.1.2 Geometría

La complejidad con respecto a la geometría de un sistema de combustión son analizados desde una geometría de cero dimensiones, por lo tanto, no presenta resoluciones espaciales sino que tiene un enfoque a un balance de masa y de energía y no implican ningún análisis de dinámica de fluidos. Se puede decir que el nivel de complejidad aumenta hasta llegar a un modelado multidimensional, pasando antes por un modelado de una dimensión (Charles & Baukal, 2000).

2.13.1.3 Reacciones químicas

Al igual que la geometría, dependiendo el análisis que se realizará existen niveles de complejidad en el empleo de la cantidad de ecuaciones químicas que intervienen en la reacción. Versteeg et al. (1995) exponen que; de no ser necesario el

análisis en detalle de la cinética, cuando lo que preocupa es la naturaleza global del proceso de combustión y solamente interesa las concentraciones finales de especies principales, correspondiente al análisis del sistema de reacción química simple (SCRS), se generaliza en forma de una sola ecuación, es decir, cuando el oxidante se combina con el combustible en proporciones estequiométricas para formar productos.

2.13.1.4 Dependencia del tiempo

La dependencia del tiempo es un factor de importancia en un modelamiento. Casi todos los procesos industriales dependen del tiempo, sin embargo estos modelados son establecidos como sistemas estacionarios debido a las limitaciones de los submodelos turbulentos, al aumento en el tiempo del computador y la falta de necesidad de información detallada en sistemas de combustión industrial (Versteeg et al., 1995).

2.13.1.5 Ecuaciones

Los códigos CFD presentan diversas ecuaciones que ayudaran a representar el problema ingenieril modelado. Las principales ecuaciones son basadas en fenómenos de turbulencia, la conservación de masa y de energía, el transporte de especies químicas, entre otras. La elección de los mismos, es intrínseco de cada estudio. Versteeg et al. (1995) menciona ecuaciones dedicadas a:

- ***Dinámica de fluidos:*** En la combustión industrial, normalmente se supone que los flujos tienen un número Mach bajo, lo que simplifica la dinámica del fluido donde el flujo es incompresible. Uno de los algoritmos más antiguos y aun ampliamente utilizados fue desarrollado por Patankar y Spalding. El algoritmo es

conocido por el acrónimo SIMPLE, que significa ecuación ligada a la presión semi-implícita.

- **Transferencia de calor:** La ecuación de la transferencia de calor contiene términos para calcular la radiación que dependen de las temperaturas absolutas elevada a una cuarta potencia lo que hace que el sistema sea altamente no lineal y mucho más difícil de ser resuelta.
- **Química:** Se han propuesto muchos esquemas para la cantidad de ecuaciones y velocidades de reacción que se pueden usar para simular reacciones de combustión. Uno que se ha usado comúnmente se conoce como CHEMKIN, que se desarrolló en *Sandia National Labs*. Las ecuaciones seleccionadas dependerán del tipo de investigación que se realice.
- **Fases múltiples:** La combustión que implica combustibles sólidos o líquidos representan un gran esfuerzo de modelado y es significativamente complicado. En los estados Unidos, la mayoría de procesos de combustión industrial utilizan combustibles gaseosos.

2.13.1.6 Condiciones iniciales y de frontera

Cualquiera que sea la metodología numérica seleccionada para resolver las ecuaciones de gobierno, se tiene que especificar las condiciones iniciales y de contorno o frontera adecuadas. Las condiciones iniciales se consideran al fluido en un tiempo $t=0$. Al igual que las condiciones iniciales, las condiciones de frontera dependerán de los parámetros especificadas en el sistema que se estudie (Blazek, 2015).

2.13.1.7 Discretización y método de solución

La discretización es el paso de las funciones o de los modelos (integro-diferenciales) aplicados a contrapartes discretas (ecuaciones algebraicas) para obtener resultados aproximados. Posteriormente estas ecuaciones pueden resolverse en una variedad de formas. La elección del método de solución, así como los enfoques utilizados para la discretización depende del tipo de problema (Charles & Baukal, 2000).

2.13.1.8 Validación del modelo

En general la validación de los modelos estudiados por diferentes investigadores deben ser constantemente probados contra mediciones experimentales cuando se aplican a nuevos problemas. Se debe tener muy en cuenta que la validación del modelo es particularmente difícil para los problemas de combustión industrial debido a la dificultad de realizar mediciones en ambientes hostiles y al costo involucrado en realizar esas mediciones.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Análisis situacional

3.1.1 Descripción general del área de estudio

El proceso de interés del presente estudio se encuentra englobado dentro de varias etapas consecutivas llevadas a cabo en una ACERÍA. De manera general se lo puede representar como se muestra en la Figura 7:

Figura 7

Proceso general llevado a cabo en una acería.



La primera etapa, constituyen procesos particulares de recolección, clasificación y elección del acero reciclado (chatarra), y será destinada como cargas para el horno de arco eléctrico; junto con ferroaleaciones, cal, carbón, y entre otras sustancias lograrán que se obtenga el producto final con la calidad especificada. En la segunda etapa existe la presencia de un EAF similar al puntualizado en la sección 2.11.1.1, con una capacidad de producción general de 30 toneladas de acero líquido por cada 36 toneladas de chatarra. Dicho horno cuenta con fuentes de energía química generada por una reacción de combustión entre el GLP y el aire enriquecido, proceso en el que se enfoca el presente estudio, y cuya disposición es similar a la mostrada en la Figura 5. La función principal de la combustión llevada a cabo en los quemadores es; coadyuvar al proceso de fundición desarrollado en el EAF. Algunas acotaciones de interés sobre la

energía química en el proceso de fundición de acero reciclado se discutieron en el primer capítulo. En esta etapa también existen hornos cuchara dirigido a la afinación y transporte del acero líquido hacia dispositivos en los que se llevará a cabo el proceso de solidificación del acero líquido (moldes), generada en la tercera etapa. Las palanquillas son obtenidas en el área de colada continua mediante sistemas de enfriamiento en moldes de cobre por intercambiadores de calor proporcionado en tres líneas diferentes por chaquetas de enfriamiento con agua en cada línea. Por lo general, en esta etapa el acero a una temperatura de 1600 °C es enfriada hasta 250 °C. La palanquilla es un semiproducto que posteriormente será convertido en distintos productos finales, principalmente materiales para la construcción mediante procesos de laminación y otros.

3.1.2 Descripción del sistema analizado

El sistema de estudio está comprendido dentro de un EAF. El horno está equipado con un sistema de quemador, herramienta de inyección compacta que funciona en tres modos principales:

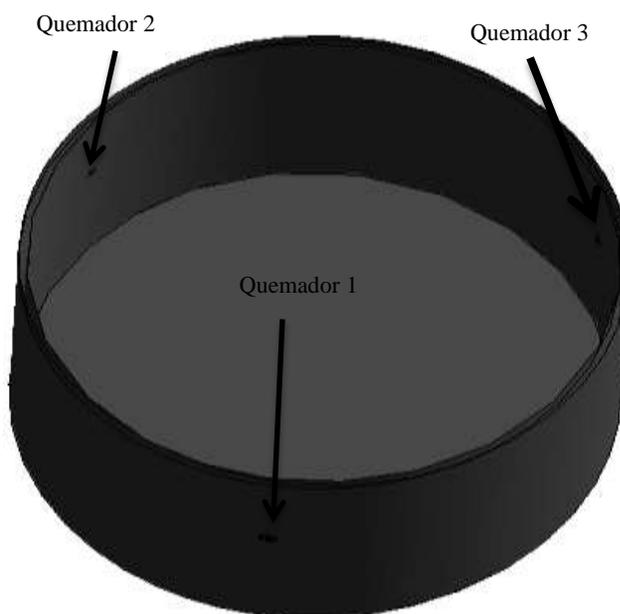
- Quemador
- Lanza
- Lanza supersónica

Este quemador se compone de tres entradas para suministrar: oxígeno principal (perforación central), oxígeno secundario y combustible. El calentamiento de las zonas frías dentro del horno comienza en el modo de quemador. El corte y la fusión de la chatarra es realizado en el modo lanza, y el refinado u homogenizado comienza en el modo lanza supersónica al aumentar el caudal de oxígeno desde la boquilla principal o

perforación central (PC). La distribución de los quemadores con respecto al diámetro del EAF es de 120° de separación entre quemador (ver Figura 8). El Anexo A muestra las salidas de oxígeno y combustible en la geometría del quemador.

Figura 8

Distribución de los quemadores dentro del EAF.



Para los diferentes modos de uso del quemador son empleadas configuraciones preestablecidas del caudal de salida de los gases, denominados perfiles, estos estarán en función del avance y uso de la energía eléctrica producida por los arcos eléctricos. La disposición de las perforaciones del quemador (orificios de salidas de flujos) posee ciertas características principales que son resumidas en el Anexo B.

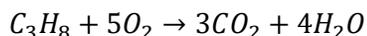
3.2 Determinación de los parámetros químicos para la optimización del proceso de combustión

3.2.1 Especificación de la composición de hidrocarburos del GLP

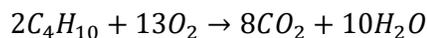
Los análisis de la composición de hidrocarburos del GLP son realizados mediante un cromatógrafo de gases según lo estipulado en el método de ensayo ASTM D2163. La información de este análisis de caracterización tiene como fin; identificar los componentes reactivos, y sus fracciones molares dentro de la mezcla gaseosa, por lo tanto, intervendrán en la reacción de combustión. El informe de resultados de esta caracterización ha sido solicitada por ADELCA hacia los laboratorios de la agencia que suministra este gas (EP-PETROECUADOR). Los resultados de interés se encuentran en el Anexo C.

3.2.2 Determinación de la reacción química de la combustión del GLP

Tras conocer y cerciorar la composición de hidrocarburos del combustible (propano y butano) y mediante una vasta revisión bibliográfica, se establece que la reacción de combustión ideal del GLP se lleva a cabo de manera individual para cada componente de la mezcla. No es recomendable describirla como una reacción en forma global debido a la naturaleza estricta de las reacciones químicas. Además, las ecuaciones descritas a continuación son de suma importancia en el modelamiento y simulación de la combustión del presente estudio, siendo estas:



Reacción 9. Combustión del propano.



Reacción 10. Combustión del butano.

Para este estudio se asume que: las reacciones de combustión son llevadas a cabo en un solo paso y la combustión es completa, es decir que los productos de combustión contemplados únicamente serán CO_2 y H_2O tanto para la reacción de combustión del propano como la de butano. Se considera además una nula influencia del nitrógeno como reactivo, debido a su baja presencia en la corriente oxidante y por ser considerado un gas inerte.

3.2.3 Optimización de los flujos volumétricos de GLP y aire enriquecido de los perfiles 2 y 3

Como se puntualizó en las secciones anteriores, un perfil es un grupo de información establecida y programada para el empleo automático durante el desarrollo de la operación de fundición de la chatarra.

Existen perfiles enfocados al calentamiento, la fundición y el refinamiento del acero reciclado, los mismos que son llevados a cabo por tres quemadores de igual diseño y distribuidos equitativamente en ángulos de 120° dentro del EAF. Los perfiles analizados están orientados al calentamiento de la chatarra, y son mostrados en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5

Perfil 2 (caudales de aire, de GLP, ratio y potencia equivalente).

Nombre del perfil	Increased Burner Power
Flujo de aire como lanza (Nm^3/h)	42
Flujo de aire como quemador (Nm^3/h)	506
Relación aire como quemador/GLP	5,5
Flujo de GLP (Nm^3/h)	92
Potencia equivalente como quemador (MW)	3

Tabla 6

Perfil 3 (caudales de aire, de GLP, ratio y potencia equivalente).

Nombre del perfil	Full Burner Power
Flujo de aire como lanza (Nm^3/h)	42
Flujo de aire como quemador (Nm^3/h)	506
Relación aire como quemador/GLP	5,5
Flujo de GLP (Nm^3/h)	92
Potencia equivalente como quemador (MW)	3

El ratio es la relación entre el agente oxidante y el combustible, es decir es la relación que determina la cantidad de aire necesaria para una cantidad de combustible establecida en la combustión desarrollada en los quemadores del EAF.

La información entregada por parte de la empresa acerca de la composición del combustible, así como la composición de la corriente oxidante (Anexo D) es resumida en la Tabla 7.

Tabla 7

Composiciones de los flujos empleados en la combustión dentro del EAF.

Corriente	Composición en fracción volumétrica (Porcentaje)	Fracción másica
GLP	75% Propano 25% Butano	0,69 0,31
Aire como quemador (Planta VSA)	85-92% Oxígeno	0,86-0,93
Aire como lanza (Planta ASU)	99,9% Oxígeno	0,99

La tabla anterior muestra una variación considerable en lo concerniente a la composición del aire empleado para los perfiles 2 y 3 (aire como quemador).

De acuerdo con la Reacción 9 y 10, se ha corregido las moles de oxígeno puro necesario para “quemar” el propano y el butano, según su porcentaje en fracción volumétrica en las que se encuentran en la mezcla GLP, estos resultados son mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8

Moles de oxígeno empleados en la combustión de propano y butano.

Moles oxígeno dirigidos al propano a 75% V/V	Moles oxígeno dirigidos al butano a 25% V/V	Moles de oxígeno total para la mezcla
3,75	1,62	5,37

De manera similar, se realizó la respectiva corrección para la determinación de las moles de oxígeno en el rango de pureza establecido en la Tabla 7, dirigidos al propano, al butano y a la mezcla. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Influencia de del oxígeno sobre las moles necesarias para la combustión de glp.

% V/V O2	Fracción molar O2	Fracción molar C3	Fracción molar C4	Moles oxígeno dirigidos al propano	Moles oxígeno dirigidos al butano	Moles de oxígeno total para la mezcla
85	0,85	0,75	0,25	4,41	1,91	6,32
86	0,86	0,75	0,25	4,36	1,88	6,24
87	0,87	0,75	0,25	4,31	1,86	6,17
88	0,88	0,75	0,25	4,26	1,84	6,10
89	0,89	0,75	0,25	4,21	1,82	6,03
90	0,9	0,75	0,25	4,16	1,8	5,96
91	0,91	0,75	0,25	4,12	1,78	5,90
92	0,92	0,75	0,25	4,07	1,76	5,83
99,9	0,99	0,75	0,25	3,75	1,63	5,38

La particularidad de diseño del quemador (Anexo A) y los perfiles manejados en el calentamiento de la chatarra mostrados en la Tabla 5 y 6 son consideraciones de suma importancia, dado que existen dos corrientes de salida de oxígeno (con diferente pureza de O_2) que influirán como flujo oxidante en la combustión del GLP.

La perforación central (PC) del quemador emana un caudal de aire con pureza del 99,9% V/V de oxígeno, según el perfil que se emplee. En el presente trabajo se propone los flujos considerando y no la influencia de este caudal, se aclara que el estudio no se enfoca en diseño (disposición de las perforaciones) del quemador ni a la eficiencia del contacto ideal entre los gases generados por este diseño.

Finalmente y debido a la variación de la composición del oxígeno dentro de la corriente oxidante, para fines de cálculos y fines prácticos se establece como 88% V/V de pureza de oxígeno en la corriente de aire como quemador, determinando en la Tabla 10 los flujos volumétricos para el perfil 2 y 3.

Tabla 10

Flujos de corriente oxidante al 88% V/V de oxígeno ideales para el perfil 2 y 3.

Perfil	Caudal de GLP (Nm^3/h)	Ratio sin influencia de PC	Caudal de O_2 sin influencia PC (Nm^3/h)	Ratio con influencia de PC	Caudal de O_2 con influencia de PC (Nm^3/h)
2	92	6,1	561	5,65	519,9
3	92	6,1	561	5,65	519,9

Una propuesta viable y recomendada para la optimización los recursos empleados en este proceso, es mantener el flujo del oxígeno de cada perfil original y determinar mediante el ratio presentado, la cantidad de GLP necesaria para la

combustión. Se presenta en la Tabla 11 los caudales de GLP obtenidos al emplear la relación de 6,1, para los perfiles de estudio.

Tabla 11

Flujos ideales de GLP en base al caudal de O_2 especificado para el perfil 2 y 3.

Perfil	Caudal de GLP (Nm^3/h)	Ratio sin influencia de PC	Caudal de oxígeno sin influencia de PC (Nm^3/h)	Caudal de GLP (Nm^3/h)	Ratio con influencia de PC	Caudal de oxígeno con influencia de PC (Nm^3/h)
2	82,9	6,1	506	90,3	5,65	506
3	82,9	6,1	506	90,3	5,65	506

3.3 Modelamiento y simulación numérica de la combustión

3.3.1 Elección del software

Se eligió el software ANSYS Student, versión exclusiva para estudiantes, (para el desarrollo de trabajos fuera de aulas, tareas, proyectos finales) debido a que es ideal para describir el proceso estudiado. Este software es una herramienta muy poderosa y cuya función es proporcionar soporte a la ingeniería por medio de simulaciones para predecir comportamientos de problemas o estudios de la vida real, uno de sus fuertes es el análisis relacionado a la dinámica de fluidos computacional, desarrollado para trabajar bajo la teoría de volúmenes finitos (casos fluidos). Además ofrece las herramientas necesarias para el desarrollo completo de un caso de estudio. Existen 3 etapas para la generación de una simulación CFD, y que han sido seguidas por el presente trabajo y son resumidas a continuación:

La primera, etapa denominada pre-proceso, se define la geometría de interés, en este caso se ha considerado solamente las características particularmente sustanciales para el estudio de la combustión, basado en los planos de diseño del quemador y del EAF presentes en ADELCA. En esta etapa también se ha realizado el “mallado” de la geometría que básicamente es dividir al dominio en subdominios denominados elementos o celdas y cuya forma se asemeja a una malla. Como parte final de esta etapa se especificó las entradas de los gases, la salida y las paredes que delimitan el proceso estudiado.

La segunda etapa es el procesamiento, aquí se establecieron los diferentes modelos numéricos que permitan describir el proceso estudiado, y son proporcionados mediante la base de datos del software, seguidamente estas ecuaciones son discretizadas en cada uno de los elementos generados en el mallado para posteriormente ser resueltas por el software, y así proporcionar soluciones analíticas.

En el post-proceso, considerada la tercera etapa, desarrollada tras la obtención de los resultados numéricos, se ha realizado una interpretación de los mismos, mismos que son presentados mediante gráficos, generados por la convergencia de la simulación.

3.3.2 Módulos de ejecución

La simulación a través de los modelos adecuados, ha sido desarrollada con el fin de abrir un panorama referente al funcionamiento y desarrollo del proceso de combustión, mediante el uso de un software con la capacidad de reflejar fenómenos químico y físicos relevantes.

La simulación del presente estudio conlleva el desenvolvimiento de aspectos primordiales para el proceso de combustión específico, que van desde consideraciones físicas básicas como la representación bidimensional o tridimensional mediante parámetros que sean lo más apegados al sistema real, si el tipo de mezcla inicial es premezclado o difusiva, de acuerdo al tipo de flujo; turbulento o laminar, dentro de un análisis temporal si el proceso se lo considera transitorio o estacionario, la generación de una malla apropiada capaz de adaptarse a las áreas que exhiban estructuras de flujo complejas, así como también se debe verificar si los resultados son o no independientes de la malla utilizada. Conjuntamente se debe establecer las condiciones de frontera que en este estudio son las velocidades de entrada de cada gas, la temperatura, su composición, y las reacciones que se presentarán, definir los algoritmos de solución, mediante la revisión previa de estudios similares y decidir entre los métodos de solución basados en la presión o densidad. Además de elegir un modelo de turbulencia adecuado que permita interpretar el fenómeno estudiado, los parámetros numéricos como esquemas de diferenciación, número de iteraciones, criterios de convergencia, etc. Son algunas de las medidas necesarias para el desempeño correcto de la presente simulación.

En la Figura 9 se muestra un diagrama representativo que explica de manera general los módulos con los que se ha desarrollado la simulación, y se encuentran englobados en las etapas de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento como se detallará en las secciones siguientes.

Figura 9

Diagrama del desarrollo metodológico básico de simulación en CFD.



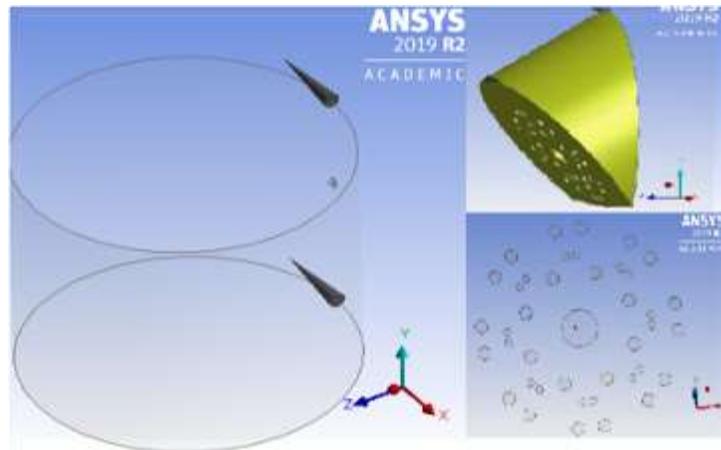
3.3.3 Pre-procesamiento

3.3.3.1 Creación de la geometría de estudio

El dominio computacional hace referencia a una forma simplificada de un dominio real o físico en términos de su representación geométrica y condiciones de contorno. En esta simplificación se debe conservar las características físicas más importantes del problema, siendo una práctica común ignorar los detalles menores. La creación de la geometría, basada en los planos proporcionados por la empresa, fue reproducida en el módulo que ofrece el mismo software (*Geometry*), aunque existe la posibilidad de generar la geometría en otros programas específicos e importar al interfaz de *workbench* (ansys). Además el software permite la creación de geometrías en dos subprogramas diferentes: *SpaceClaim* y *Desing Modeler*. Se ha elegido el submódulo *Geometry-Desing Modeler*, debido a que posee todas las herramientas necesarias para la generación de la geometría del estudio, mostrada en la Figura 10.

Figura 10

Geometría general.



La figura anterior muestra la geometría global (un solo cuerpo) del estudio, realizada en un dominio 3D, la cual está compuestas por dos partes esenciales: el contorno del EAF (representado por un cilindro) y las perforaciones del quemador. Como se mencionó anteriormente, el EAF cuenta con 3 quemadores, sin embargo para el caso de estudio se toma en consideración solamente la influencia de un quemador, debido a que el análisis se volvería más complejo (costo computacional) y porque se asume que los dos quemadores restantes replicarían el mismo comportamiento. Las consideraciones más importantes de este módulo se encuentran en el Anexo B.

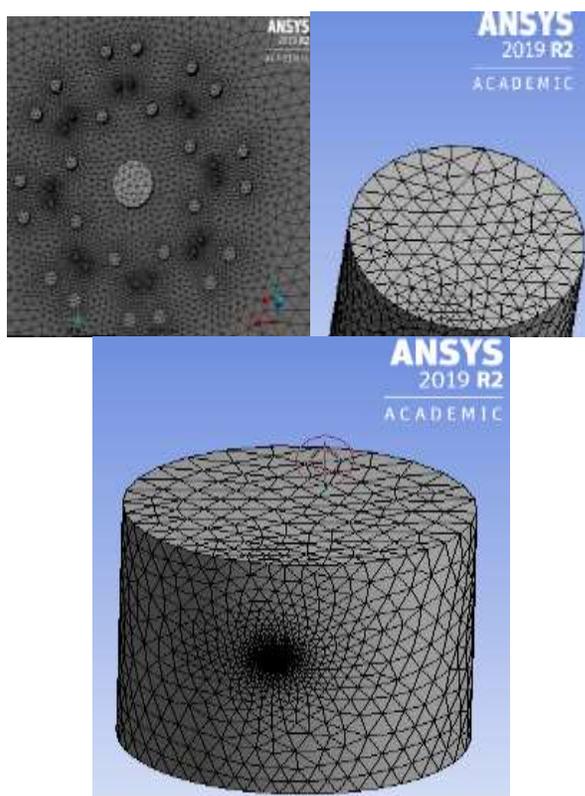
3.3.3.2 Generación del mallado

El mallado consiste en dividir al dominio de estudio en volúmenes de control discretos (subdominios) utilizando una cuadrícula computacional, a cada una de las divisiones se las denomina elementos o celdas, esto se lo realiza con el fin de que en cada elemento, las ecuaciones de los modelos sean resueltas por el código CFD. El proceso mediante el cual las ecuaciones diferenciales son transformadas en ecuaciones algebraicas se lo denomina discretización.

Se ha empleado un mallado de tipo no estructurado (Figura 11) desarrollado en el módulo *mesh*, debido a que este tipo de mallado presenta una adaptación eficiente a geometrías de cuerpos curvos (usando formas tetraédricas), y además de generar un menor tiempo computacional en la convergencia del problema.

Figura 11

Mallado del dominio.



En lo concerniente al módulo *mesh*, se recalca las principales características detalladas en la Tabla 12.

Tabla 12

Estadísticas del mallado del dominio de estudio.

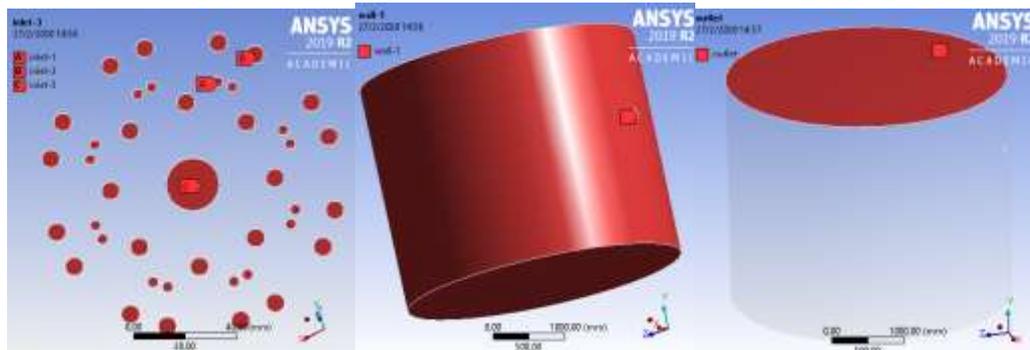
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	62367
<input type="checkbox"/> Elements	339467

Se ha conseguido un mallado intermedio con un número de elementos de 339467, todas con formas tetraédricas, valor que fue obtenido mediante la aplicación de parámetros que favorecen a limitar el número de elementos en un máximo de 512000, por motivos competentes de la versión del software académico, y se ha enfatizando el refinamiento en la zona de interés, lo que significa que se ha prestado mayor atención en el lugar donde se desarrolla la combustión.

En este mismo módulo se ha establecido todas las características del dominio de acuerdo al tipo de zona, es decir, el ingreso de cada uno los gases reactivos, la salida de los gases productos de la combustión, y las paredes o fronteras que lo delimitan (Figura 12).

Figura 12

Entrada de los gases, pared, y salida (izquierda a derecha).



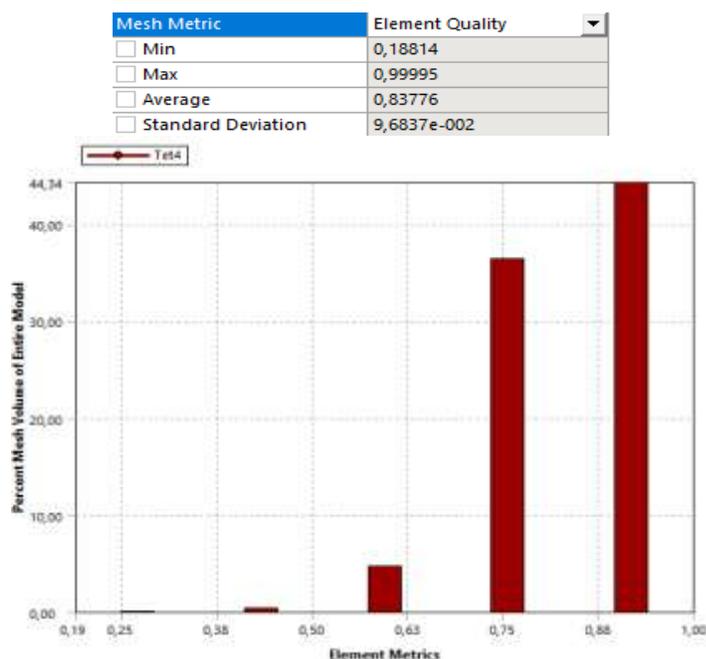
3.3.3.2.1 Calidad de la malla

Existen parámetros que determinan la calidad del mallado, dicha información se la puede encontrar en el mismo módulo, en la opción *mesh-quality-mesh metric*, entre los principales parámetros se encuentran:

- **Calidad del elemento.**- Su valor oscila en el rango de 0 a 1, y es recomendable que los elementos tiendan a 1 o idealmente se encuentren en 1, debido a que la unidad representa un cuadrado perfecto (análisis 2D) o un cubo perfecto (análisis 3D) (Monje Jingo, 2017). La Figura 13 muestra el porcentaje del número de elementos respecto al parámetro; elementos de calidad, para el presente trabajo.

Figura 13

Elementos de calidad de la malla generada.



El diagrama de barras de la Figura 13, muestra que cerca del 45% de los elementos se encuentran en un valor de 0,9 de elementos de calidad, seguidamente de un 37% posicionado en un 0,75, de manera general la mayoría de elementos se encuentran en valores mucho mayores que 0,5 de elementos de calidad con un promedio de 0,84; lo que nos permite concluir que la malla es buena en cuanto a este parámetro.

- **Oblicuidad.-** Este parámetro de calidad basa su medida en que tan cerca de una cara ideal está el elemento. La determinación de calidad de los elementos mediante este parámetro se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Rangos de oblicuidad y calidad de elemento respectiva.

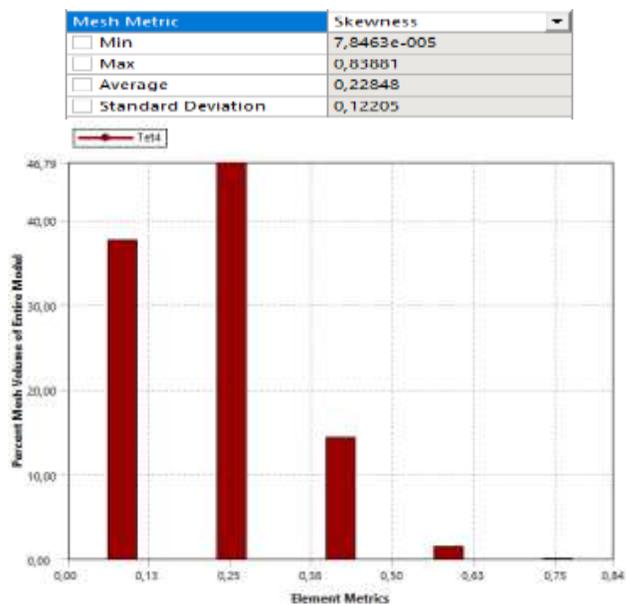
Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 – <1	bad (sliver)
0.75 – 0.9	poor
0.5 – 0.75	fair
0.25 – 0.5	good
>0 – 0.25	excellent
0	equilateral

Nota: (Monje Jingo, 2017).

Se ha obtenido un promedio de oblicuidad de 0,23, con cerca del 85% de celdas totales mayor a 0,25 del elemento métrico, considerándolo según la Tabla 13 una buena calidad de elementos. Estos resultados se muestran en la Figura 14.

Figura 14

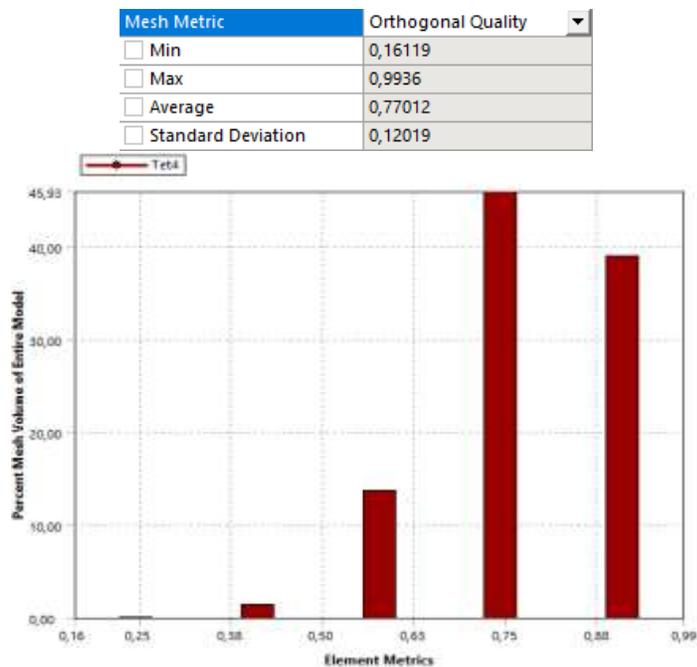
Distribución de los elementos en porcentaje vs. oblicuidad en la malla de estudio.



- **Ortogonalidad.-** Este parámetro es un índice que hace alusión al desfase entre elementos; su rango va desde 0 a 1, siendo recomendable trabajar con valores cercanos a 1. Los valores obtenidos respecto a este parámetro son mostrados en la Figura 15, y cuyo promedio es de 0,77 por lo que, se considera de calidad aceptable.

Figura 15

Distribución de los elementos en porcentaje vs. ortogonalidad del mallado de estudio.



3.3.4 Procesamiento

Esta etapa conlleva su desarrollo abordo de dos submódulos: *setup* y *solution*, el primero destinado a la configuración de todos los parámetros que permitan describir el fenómeno estudiado y el segundo destinado hacia las configuraciones que permitan solucionar los parámetros fijados en el submódulo precedente. El procesamiento fue desarrollado en su totalidad en el módulo *Fluent*.

3.3.4.1 Submódulo Setup: Configuraciones del solucionador

Son las primeras configuraciones que se establecieron dentro del módulo *Fluent*, y tienen una relación directa con los métodos de solución del sistema estudiado. En primera instancia, dentro de estas configuraciones se define el tipo de operación del proceso en función de la dependencia con el tiempo. Debido a que el fenómeno de combustión estudiado está regido en base a perfiles preestablecidos (caudales constantes), se lo ha considerar como un proceso en régimen permanente o en estado estacionario.

El software maneja dos códigos CFD principales para la solución de problemas, uno basado en la densidad y otro basado en la presión del fluido, y aunque en los inicios se crearon para describir problemas diferentes, en la actualidad, los constantes reajustes y perfeccionamientos del software han hecho indistintos el uso general de estas dos opciones, sin embargo existen excepciones en cuanto a la forma de ingreso de los gases reactivos se refiere (tipos de mezcla). Se eligió el solucionador basado en la presión debido a que en el fenómeno de la combustión estudiada, el oxidante y el combustible se encuentran separados antes de ingresar en la zona de reacción donde se mezclan y se queman (llamas no premezcladas o llamas de difusión), aquí el transporte del oxidante y del combustible a la zona de reacción ocurre principalmente por difusión. El solucionador basado en la presión activa opciones posteriores referentes al tipo de mezcla de los gases, siendo este enfoque el ideal para el estudio analizado. Además una ventaja adicional al usar el solucionador basado en la presión es que el problema converge en menor tiempo.

Por último, se ha fijado la opción *absolute* dentro del enfoque relacionado con la formulación de la velocidad. Este tipo de perspectiva relaciona la velocidad y su

distribución dentro de un sistema. El enfoque absoluto describe problemas relacionados a la existencia una baja interacción influenciada por la velocidad, es decir, la mayor parte del dominio se encuentra en un estado relativamente estático. El enfoque elegido describe efectivamente el proceso dentro del dominio estudiado (EAF-fenómeno de combustión).

3.3.4.2 Submódulo Setup: Modelos

Los modelos numéricos son utilizados para describir sistemas físicos empleando conceptos matemáticos, con la finalidad de comprender, estudiar y predecir el comportamiento del mismo. El flujo de los fluidos puede ser descrito (modelado) por las ecuaciones de Navier–Stokes, junto con ecuaciones de fenómenos asociados, acopladas a las leyes de la conservación de masa, momento y energía. Las ecuaciones generales que emplean los códigos CFD son descritas a continuación:

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

Ecuación 5. Ecuación de la conservación de la masa.

Nota: (ENEAGRID, 2009).

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

Ecuación 6. Ecuaciones de la conservación del momento.

Nota: (ENEAGRID, 2009).

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

Ecuación 7. Ecuación de la conservación de la energía.

Nota: (ENEAGRID, 2009).

En la combustión estudiada, existen fenómenos relacionados con la turbulencia y el transporte y reacción de especies químicas, por lo que, se considera la influencia de estas junto con las ecuaciones de estado del sistema fluido para la obtención de soluciones analíticas. Los modelos generales seleccionados (implementados por el módulo *fluent*) fueron:

- Modelo de turbulencia
- Modelo de combustión

3.3.4.2.1 Modelo de turbulencia

La turbulencia es uno de los dos regímenes generales de un flujo fluido, caracterizado por la alta convección, baja difusión de momento y cambios espacio temporales rápidos de velocidad y presión. En un flujo, la turbulencia se presenta en forma de remolinos, estos se encuentran dentro de una amplia gama de escalas en relación a su longitud y tiempo, estas interactúan de manera dinámicamente compleja. Debido al interés de promover o evitar este fenómeno no es de sorprenderse los diferentes esfuerzos para comprender y capturar los efectos importantes provocados por la turbulencia (Versteeg et al., 1995).

Se ha considerado en primera instancia la fijación del modelo relacionado a la turbulencia que gobierna al proceso estudiado. Mediante una extensa revisión bibliográfica previa, se ha determinado que el modelo más adecuado para describir la combustión del presente estudio es el modelo $k - \varepsilon$ (2 *eqn*) en su forma estándar debido a su robustez, economía computacional y precisión razonable para una amplia gama de flujos turbulentos, y cuyas ecuaciones generales son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (\text{a})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{b})$$

Ecuación 8. Ecuaciones de transporte para el modelo $k - \varepsilon$ estándar.

(a) Determinación de k (b) determinación de ε .

Nota: (Versteeg et al., 1995).

En palabras, los términos representan:

Tasa de cambio de k o ε	+	Transporte de k o ε por convección	=	Transporte de k o ε por difusión	+	Tasa de producción de k o ε	-	Tasa de destrucción de k o ε
--	---	--	---	--	---	---	---	--

Las ecuaciones contienen cinco constantes ajustables: C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, y $C_{2\varepsilon}$. El modelo $k - \varepsilon$ estándar utiliza valores para las constantes a las que se llega a través un arreglo de datos integral para una extensa gama de flujos turbulentos, los cuales son: (Versteeg et al., 1995):

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

Este modelo (variante de las ecuaciones *RANS*) es un modelo semi-empírico basado en ecuaciones de transporte de la energía cinética turbulenta, k y su tasa de disipación viscosa, ε . Se enfoca en los mecanismos que afectan la energía cinética, con la suposición de que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son insignificantes. Mediante el uso del análisis dimensional, la viscosidad turbulenta, μ_t , se puede suponer como:

$$\mu_t = C_p \vartheta \ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Ecuación 9. Ecuación de viscosidad turbulenta.

Nota: (Versteeg et al., 1995).

Puesto que el modelo $k - \varepsilon$ conlleva términos relacionados con la disipación de energía (transferencia de calor) la ecuación de energía en el submódulo *setup*, será habilitada automáticamente lo que incluye la implementación de la ecuación 7. La Figura 16 muestra los parámetros establecidos en relación al modelo de turbulencia empleado.

Figura 16

Parámetros establecidos para el modelo de turbulencia.



3.3.4.2.2 Modelo de combustión

La combustión del GLP del presente trabajo se ha modelado en base al transporte y reacción de las especies químicas (reacciones de tipo volumétricas). Respecto a la interacción turbulencia química se utilizó el modelo generalizado de

disipación de remolinos o *Eddy-Dissipation*, mismo que calcula la velocidad de reacción bajo la suposición de que la cinética química es rápida en comparación con la velocidad de mezcla de los reactivos por interacciones turbulentas, es decir, la velocidad de combustión está limitada por el proceso de transporte y mezcla en lugar de la cinética química. Las reacciones que intervienen en este modelo se basan en las Reacciones 9 y 10, en las que se consideró que las reacciones de combustión son llevadas a cabo en un solo paso y la combustión es completa, es decir que los productos de combustión contemplados únicamente serán CO_2 y H_2O tanto para la reacción de combustión del propano como la de butano, además de la nula influencia del nitrógeno en las corrientes reactivas debido a su baja presencia en las mismas. En la Figura 17 y 18 se presentan las distintas configuraciones que se fijaron para describir el proceso estudiado en relación al modelo de la combustión.

Figura 17

Establecimiento de las reacciones de combustión. Reacción del propano y reacción del butano (de izquierda a derecha).

The figure displays two side-by-side screenshots of a software interface for defining combustion reactions. Both screenshots show the configuration for a reaction in a 'Mixture propane-air' environment.

Left Screenshot (Reaction 1):

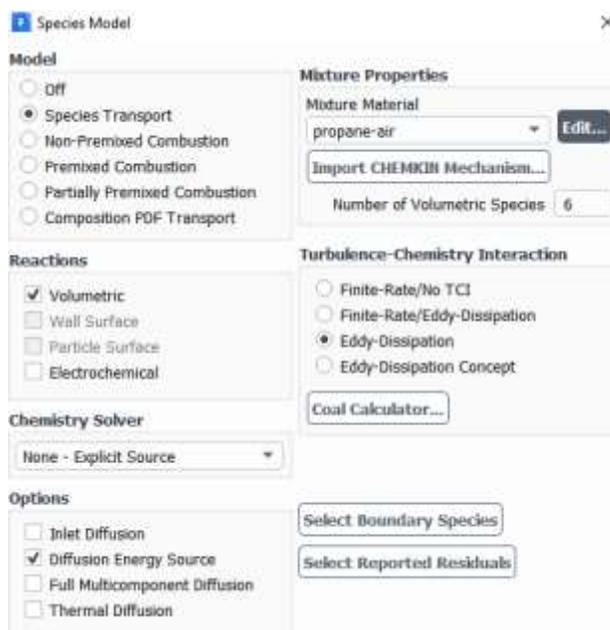
- Reaction Name: reaction-1, ID: 1, Reaction Type: Volumetric.
- Number of Reactants: 2, Number of Products: 2.
- Reactants: C_3H_8 (Stoich. Coefficient: 1, Rate Exponent: 0.1) and O_2 (Stoich. Coefficient: 5, Rate Exponent: 1.65).
- Products: CO_2 (Stoich. Coefficient: 3, Rate Exponent: 0) and H_2O (Stoich. Coefficient: 4, Rate Exponent: 0).
- Arrhenius Rate: Pre-Exponential Factor: $4.826e+09$, Activation Energy: $1.256e+08$, Temperature Exponent: 0.
- Mixing Rate: A: 4, B: 0.5.

Right Screenshot (Reaction 2):

- Reaction Name: reaction-2, ID: 2, Reaction Type: Volumetric.
- Number of Reactants: 2, Number of Products: 2.
- Reactants: C_4H_{10} (Stoich. Coefficient: 1, Rate Exponent: 0.15) and O_2 (Stoich. Coefficient: 6.5, Rate Exponent: 1.6).
- Products: CO_2 (Stoich. Coefficient: 4, Rate Exponent: 0) and H_2O (Stoich. Coefficient: 5, Rate Exponent: 0).
- Arrhenius Rate: Pre-Exponential Factor: $4.161e+09$, Activation Energy: $1.256e+08$, Temperature Exponent: 0.
- Mixing Rate: A: 4, B: 0.5.

Figura 18

Principales configuraciones del modelo de combustión del estudio.



3.3.4.3 Submódulo Setup: Condiciones de frontera

Las condiciones principales de operación del proceso de combustión, referente a los flujos de salida de los gases reactivos son fijadas en este ítem, basadas en los perfiles de estudio, (Tablas 5 y 6). Las condiciones de frontera para los gases de entrada se establecieron como de tipo *velocity-inlet* (velocidad de entrada), por lo tanto, se ha calculado las velocidades de salida de los gases para cada conjunto de perforaciones del quemador y se lo ha resumido en la Tabla 14.

Tabla 14

Características principales para la determinación de las velocidades de los gases respecto al perfil 3.

	GLP	O₂ (quemador)	O₂ (lanza)
Caudal (m³/h)	92	506	42
Velocidad (m/s)	127,1	152,1	35,3
Área (m²)	1,256E-05	3,848E-05	3,30E-04
Radio (m)	0,002	0,0035	0,01025
Diámetro de C/P (m)	0,004	0,007	0,0205
Número de orificios	16	24	1

Las velocidades anteriormente determinadas, junto con las composiciones de la (Tabla 7), son establecidas en la opción *Zones-Boundaries* del software. Las Figuras 19, 20, 21 muestran la implementación de estas condiciones.

Figura 19

Velocidad y composición de entrada de GLP.

V Velocity Inlet

Zone Name
inlet-1

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase

Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame Absolute

Velocity Magnitude (m/s) 127.1

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal) 0

V Velocity Inlet

Zone Name
inlet-1

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase

Specify Species in Mole Fractions

Species Mass Fractions

c3h8 0.69

o2 0

co2 0

h2o 0

c4h10 0.31

Figura 20

Velocidad y composición de entrada de O_2 (quemador).

V Velocity Inlet

Zone Name
inlet-2

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase

Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame Absolute

Velocity Magnitude (m/s) 152.1

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal) 0

V Velocity Inlet

Zone Name
inlet-2

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase

Specify Species in Mole Fractions

Species Mass Fractions

c3h8 0

o2 0.89

co2 0

h2o 0

c4h10 0

Figura 21

Velocidad y composición de entrada de O_2 (lanza).

Velocity Inlet

Zone Name
inlet-3

Momentum Thermal Radiation **Species** DPM Multiphase

Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame Absolute

Velocity Magnitude (m/s) 35.3

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal) 0

Velocity Inlet

Zone Name
inlet-3

Momentum Thermal Radiation **Species** DPM Multiphase

Specify Species in Mole Fractions

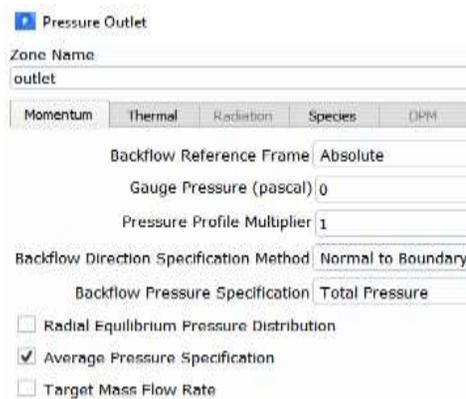
Species Mass Fractions

c3h8	0	▼
o2	0.99	▼
co2	0	▼
h2o	0	▼
c4h10	0	▼

Debido a que la salida de los gases del sistema se encontraran bajo la influencia de la presión atmosférica, se considerado la salida del sistema de tipo *Pressure-outlet* (Figura 22), Tomando como valor representativo de 0 como la presión atmosférica ambiental (1 atm).

Figura 22

Condiciones de salida de los gases.

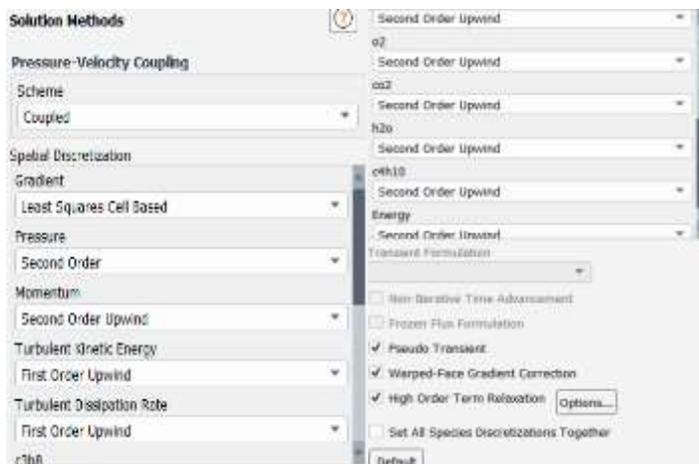


3.3.4.4 Submódulo *Solution*: Métodos de solución

Se han seleccionado los métodos de solución predeterminados (propuestos por el programa) puesto que estos están enfocados al ahorro computacional y la buena precisión de resultados. La Figura 23 muestra las configuraciones de los métodos de solución para este trabajo.

Figura 23

Configuraciones para los métodos de solución del sistema analizado.



3.3.4.5 Submódulo *Solution*: Ejecución de los cálculos

Todas las técnicas de iteración numérica resuelven las ecuaciones en cada iteración, presentando un resultado progresivamente cercano a una solución real, este proceso se lo denomina convergencia. Los parámetros de la convergencia del problema se han conservado en las opciones predeterminadas, excepto el número de iteraciones (Figura 24), establecido en 170, estos parámetros están orientados al avance de la resolución de las ecuaciones establecidas por los modelos seleccionados, de manera gráfica. El modo de conocer el estado de la convergencia en este programa se basa en la estabilización de las curvas. Si las curvas no presentan estabilidad y tienden a descender, un problema puede considerarse como resuelto o convergido cuando estas curvas alcanzan un valor de $1,0E-03$ para la mayoría de ecuaciones y de $1,0e-6$ para la ecuación de la energía. Para este estudio las curvas se han mantenido constante cerca de la iteración número 80 considerando resuelto el problema, esto es mostrado en la Figura 25. El Anexo E muestra de manera general las principales configuraciones tomadas en cuenta en la etapa; procesamiento.

Figura 24

Parámetros de la ejecución (convergencia) del estudio.

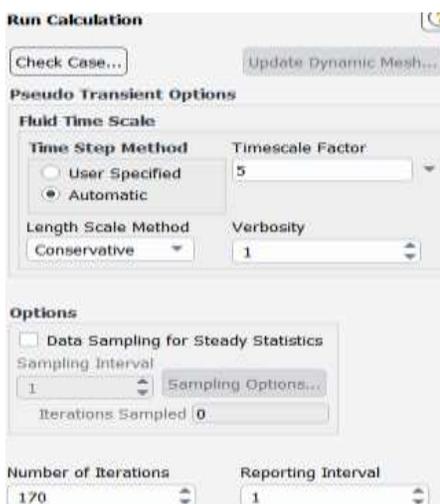
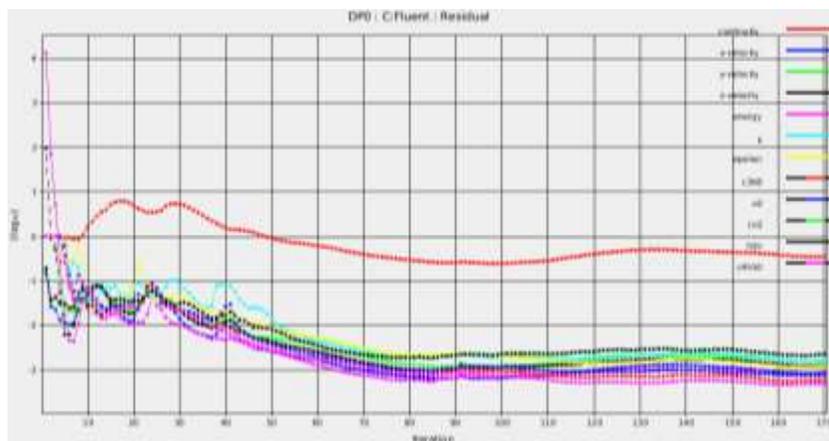


Figura 25

Avance de la convergencia del problema.



3.3.5 Post-procesamiento

Los módulos y submódulos a seguir para llegar a esta etapa (dentro del programa) se los pueden observar en la Figura 26, los mismos que deben estar correctamente desarrollados para que el sistema o la simulación genere los resultados esperados, es decir; si en cualquiera de los módulos empleados existe un error, los módulos consecuentes no tendrán la información suficiente para continuar con el análisis.

Figura 26

Esquema a seguir para el desarrollo de la simulación.



El post-procesamiento consiste en el análisis de los resultados obtenidos por la simulación, estos son obtenidos mediante el módulo *results*.

3.4 Validación

El proceso de combustión estudiado es un proceso industrial que presenta un ambiente con condiciones extremas, debido a la generación de temperaturas sumamente altas. Las reacciones de combustión se caracterizan por la presencia de llamas, haciendo que este fenómeno sea muy apreciable. Por lo puntualizado anteriormente se ha considerado la realización de una validación visual del modelamiento y la simulación desarrollada.

Esta etapa ha sido llevada a cabo gracias a la colaboración de ADELCA y su personal, bajo las condiciones de seguridad respectivas. El desarrollo del presente trabajo se enfoca en la combustión generada por los quemadores del EAF, ejecutando el perfil 2 y 3, debido a esto se ha reproducido la configuración de los parámetros de operación del perfil 3 (Figura 27), a modo de prueba, en el área de estudio y así obtener imágenes de la llama originada.

Figura 27

Perfil empleado para la validación visual.

PROFILE #3	
Full Burner Power	
42	Nm ³ /h
0	Nm ³ /h
5.5	Ratio
92	Nm ³ /h
3.0	MW

Además se ha realizado la visualización del efecto o variaciones que presenta la llama generada por los parámetros de optimización propuesta, ver Tabla 15, y el perfil 3 sin la influencia de la perforación central, ver Tablas 16.

Tabla 15

Perfil propuesto para observar comportamiento de la llama (ratio propuesto).

Nombre del perfil	Full Burner Power
Flujo de aire como lanza (Nm^3/h)	0
Flujo de aire como quemador (Nm^3/h)	561,2
Relación aire como quemador/GLP	6,1
Flujo de GLP (Nm^3/h)	92

Tabla 16

Perfil empleado para observar el comportamiento de la llama (sin influencia de pc).

Nombre del perfil	Full Burner Power
Flujo de aire como lanza (Nm^3/h)	0
Flujo de aire como quemador (Nm^3/h)	506
Relación aire como quemador/GLP	5,5
Flujo de GLP (Nm^3/h)	92

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta los resultados concernientes a la simulación del proceso de combustión, basado en el perfil 3, junto con la validación visual de la llama del proceso real llevado a cabo en los quemadores del EAF. Además se presenta imágenes de las llamas generadas por la relación aire-combustible propuestas en el presente trabajo, y cuyo enfoque es la optimización de los recursos de la empresa.

4.1 Discusión del modelo

El proceso de combustión estudiado se encuentra dentro de la clasificación del régimen turbulento, por lo que, los campos de velocidad que exhibe este proceso es sumamente variable respecto al espacio y tiempo. La llama generada por el proceso estudiado es de tipo difusiva, puesto que los gases reactivos efluyen por distintas zonas del quemador, dependiendo de la distribución de las perforaciones y de la turbulencia generada para su correcto contacto (mezclado). Debido a esto, el enfoque de la turbulencia y sus efectos sobre la reacción de combustión es un fuerte punto de interés a ser analizado.

El modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ en su variante estándar, elegido en este trabajo, históricamente ha tenido una buena acogida en el modelamiento y simulación de proceso de combustión industrial, puesto que entrega información completa empleando un costo computacional bajo. Este modelo básicamente se centra en los mecanismos que afectan la energía cinética turbulenta.

4.2 Resultados del modelado y la simulación numérica

Los cálculos de la simulación numérica han sido ejecutados en una computadora a través del software ANSYS student, implementando modelos numéricos para la descripción de procesos físicos.

4.2.1 Dominio computacional

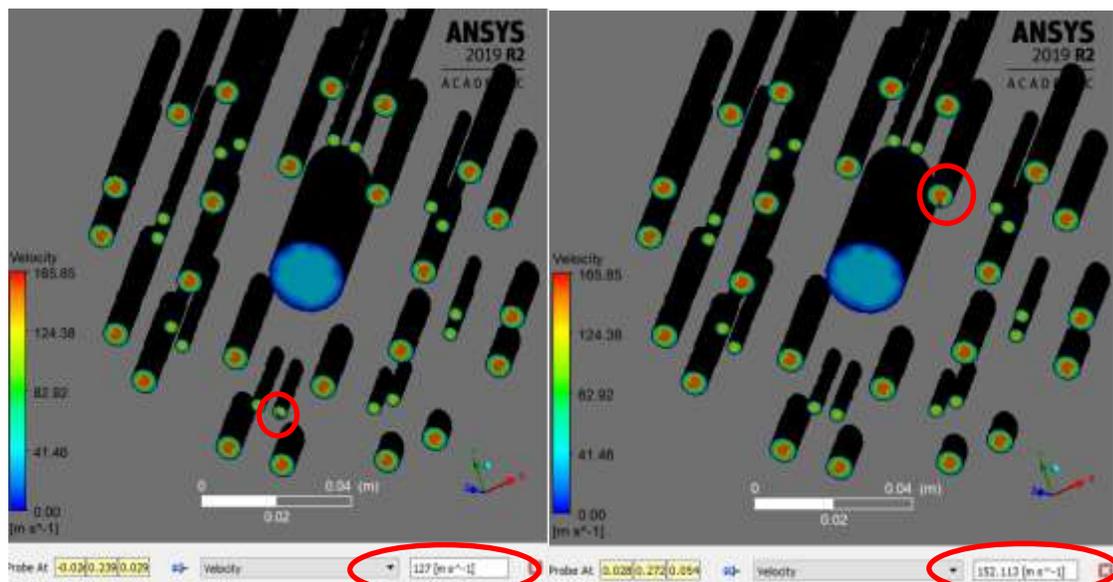
Para el presente trabajo se ha considerado un dominio mayormente fluido, representado por un límite simple en forma de cilindro, asimilando la forma del horno. Puesto a que el estudio se enfoca en la combustión llevada a cabo aguas arriba de los quemadores, se ha reproducido la distribución exacta de las perforaciones con sus respectivos diámetros (Anexo B) basado en los planos entregados por la empresa. El dominio de estudio en detalle se muestra en el Anexo F.

4.2.2 Ingreso de los gases reactivos

En la simulación obtenida, el ingreso del GLP y de la corriente oxidante ha sido verificado, reflejando las condiciones de operación del perfil 3 (Tabla 6), controlando que el proceso de combustión simulado se desarrolle correctamente. La Figura 28 muestra el ingreso efectivo de las corrientes gaseosas reactivas en relación a sus velocidades, mientras que la Figura 29 muestra el ingreso efectivo de las corrientes gaseosas reactivas en relación a su composición.

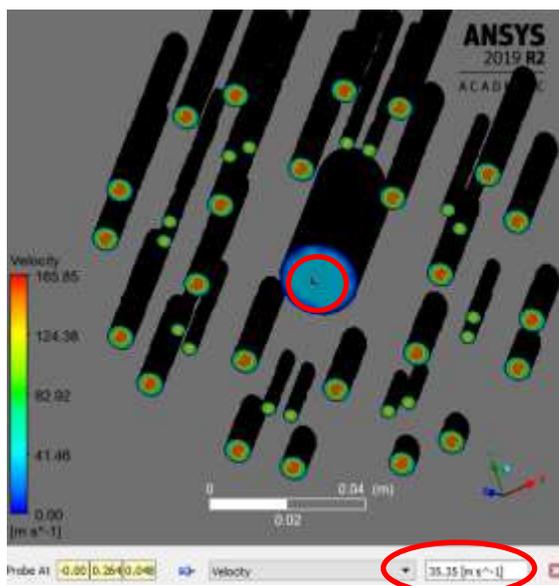
Figura 28

Comprobación de las velocidades de ingresos. (a) GLP, (b) O_2 como quemador, (c) O_2 como lanza.



(a)

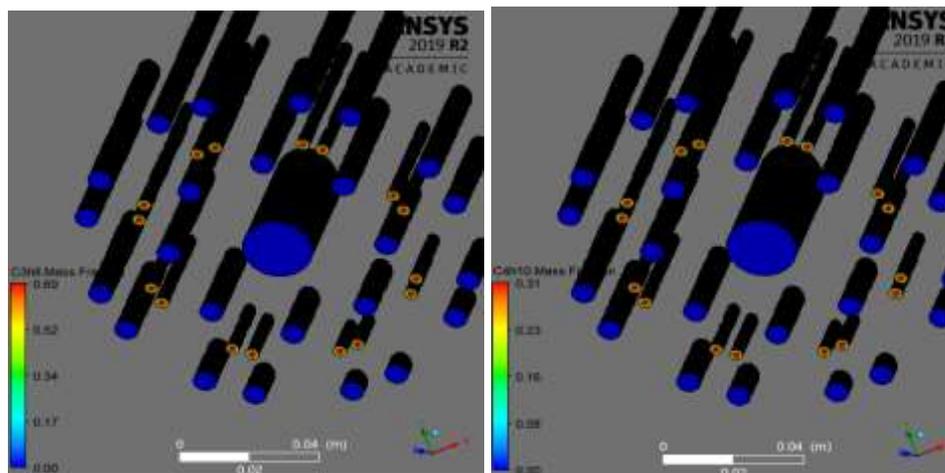
(b)



(c)

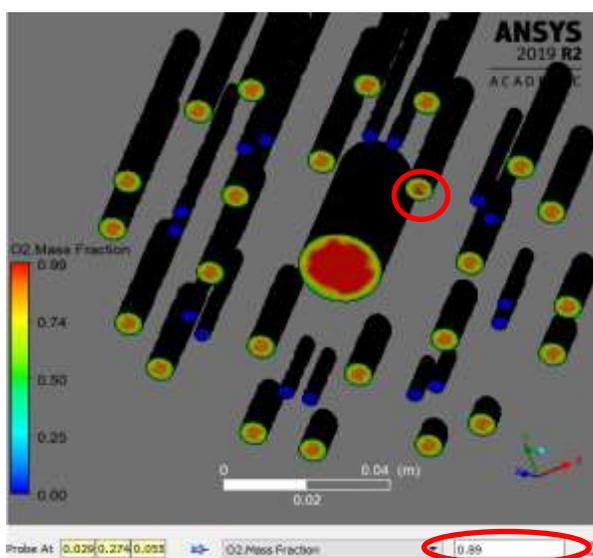
Figura 29

Comprobación de la composición de ingreso de los gases reactivos, en relación a su composición (fracción másica). (a) propano, (b) butano, (c) O_2 .



(a)

(b)



(c)

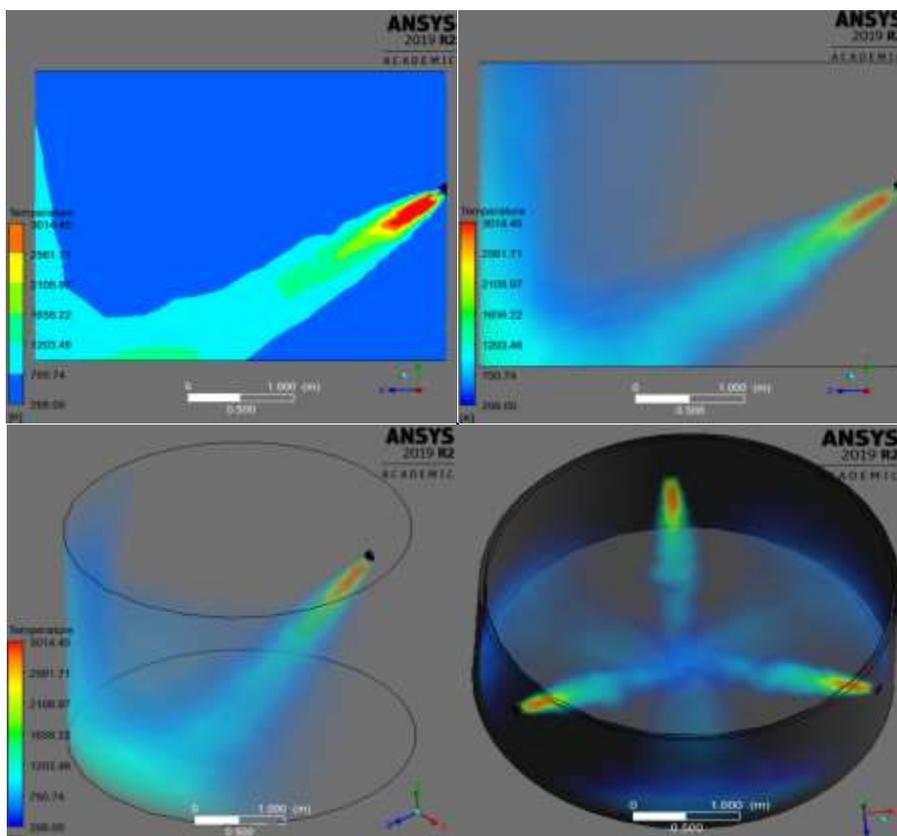
4.2.3 Campos de temperaturas

Los perfiles de temperatura resultantes siguen el modelo de combustión fijado previamente, estableciendo principalmente la reacción de combustión del propano y el

butano de un solo paso. De acuerdo al enfoque de la interacción turbulencia química se ha seleccionado el modelo de disipación de remolinos que básicamente describe a la combustión en cualquier sitio que exista turbulencia. En la Figura 30 se puede visualizar los perfiles de temperatura resultantes.

Figura 30

Campos de temperatura.



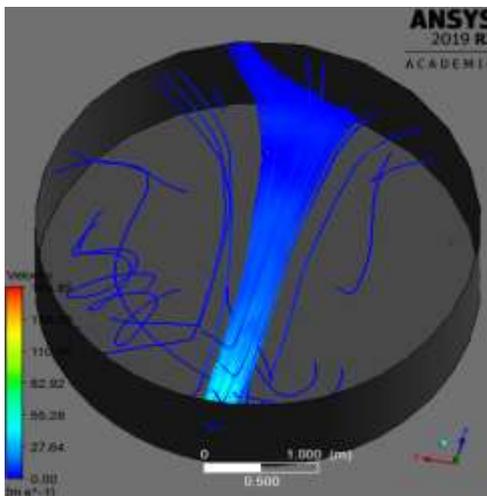
Se puede apreciar en la figura anterior que los campos de temperatura poseen una relativa estabilidad, la cual se la atribuye a la integración de la corriente oxidante, direccionando al campo en línea recta. Respecto a la temperatura se observa un máximo de 3014 K, valor cercano a la temperaturas de llama adiabática del propano y butano (Tabla 4) reportado por Charles & Baukal, (2000).

4.2.4 Líneas de flujo

Las líneas de flujo o corriente muestran la trayectoria por la que viajará un elemento fluido. Visualmente nos puede dar una idea del régimen de flujo (laminar o turbulento). La Figura 31 muestra las líneas de flujo que describe el proceso analizado.

Figura 31

Líneas de flujo.



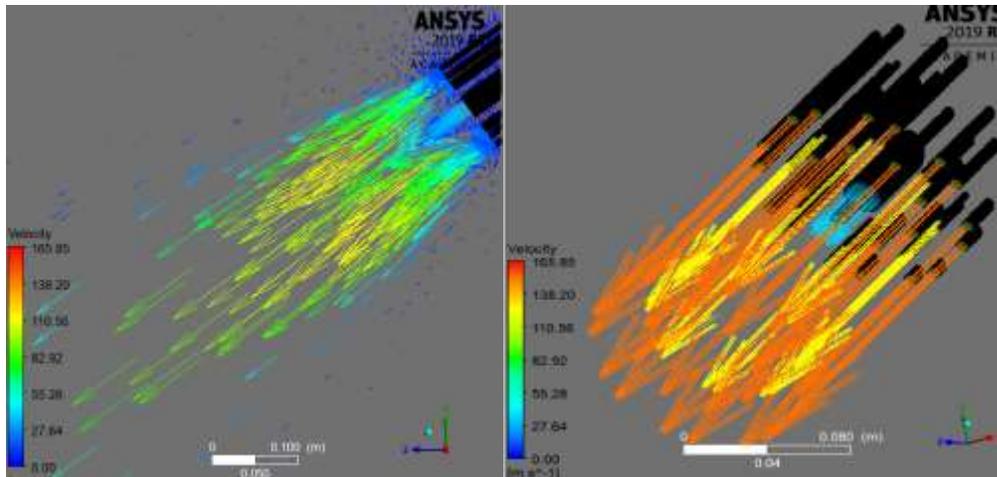
Como se puede observar en la figura anterior, los patrones de corriente al inicio de la trayectoria son relativamente estables, mientras que al avanzar presentan una recirculación provocada por las paredes limitantes, siendo más prominente en un lado que en su contraparte.

4.2.5 Vectores de velocidad

Los vectores de velocidad proveen una excelente visualización del flujo, representando detalles de su estructura en forma de estela. La Figura 32 muestra de manera práctica el desarrollo de las corrientes que actúan, mediante los vectores generados por la simulación.

Figura 32

Vectores de velocidad.



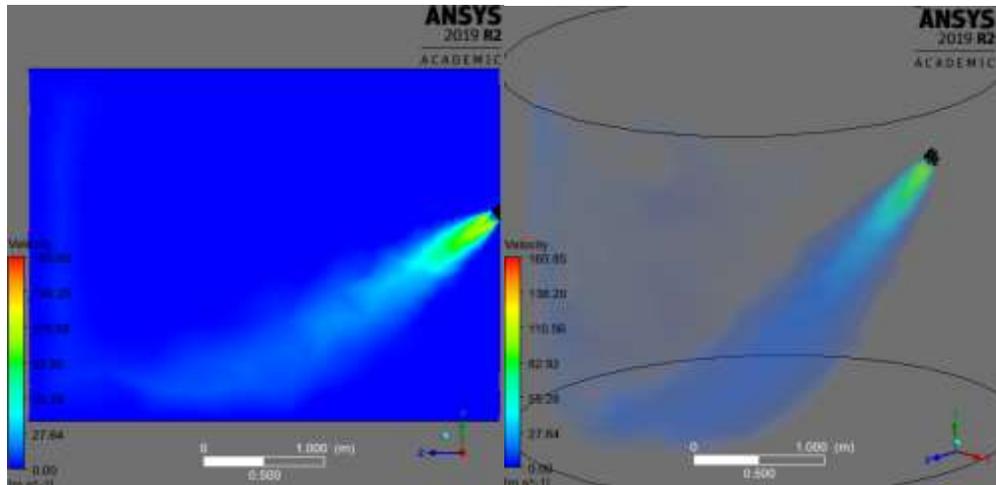
La figura anterior muestra la forma en la que interactúan los flujos y la relación que existe entre las velocidades de los gases, en otras palabras nos indica que los flujos representados por los vectores naranja poseen mayor velocidad (oxígeno como quemador), los de color amarillo una velocidad media (GLP) y los vectores de menor tamaño representan los flujos que ingresan a una baja velocidad (oxígeno como lanza).

4.2.6 Campos de velocidad

Los campos de flujo generados por la simulación se muestran en la Figura 33.

Figura 33

Campos global de velocidades.



Se evidencia efectivamente que la máxima velocidad se encuentra en la salida del quemador y dicha propiedad va menguando de manera considerable mientras continua su trayectoria.

4.2.7 Distribución de las especies químicas

La manera como se distribuyen las especies presentes en la reacción de combustión del GLP puede ser observada de manera didáctica en las siguientes figuras:

Figura 34

Distribución de las especies químicas reactivas. (a) propano, (b) butano.

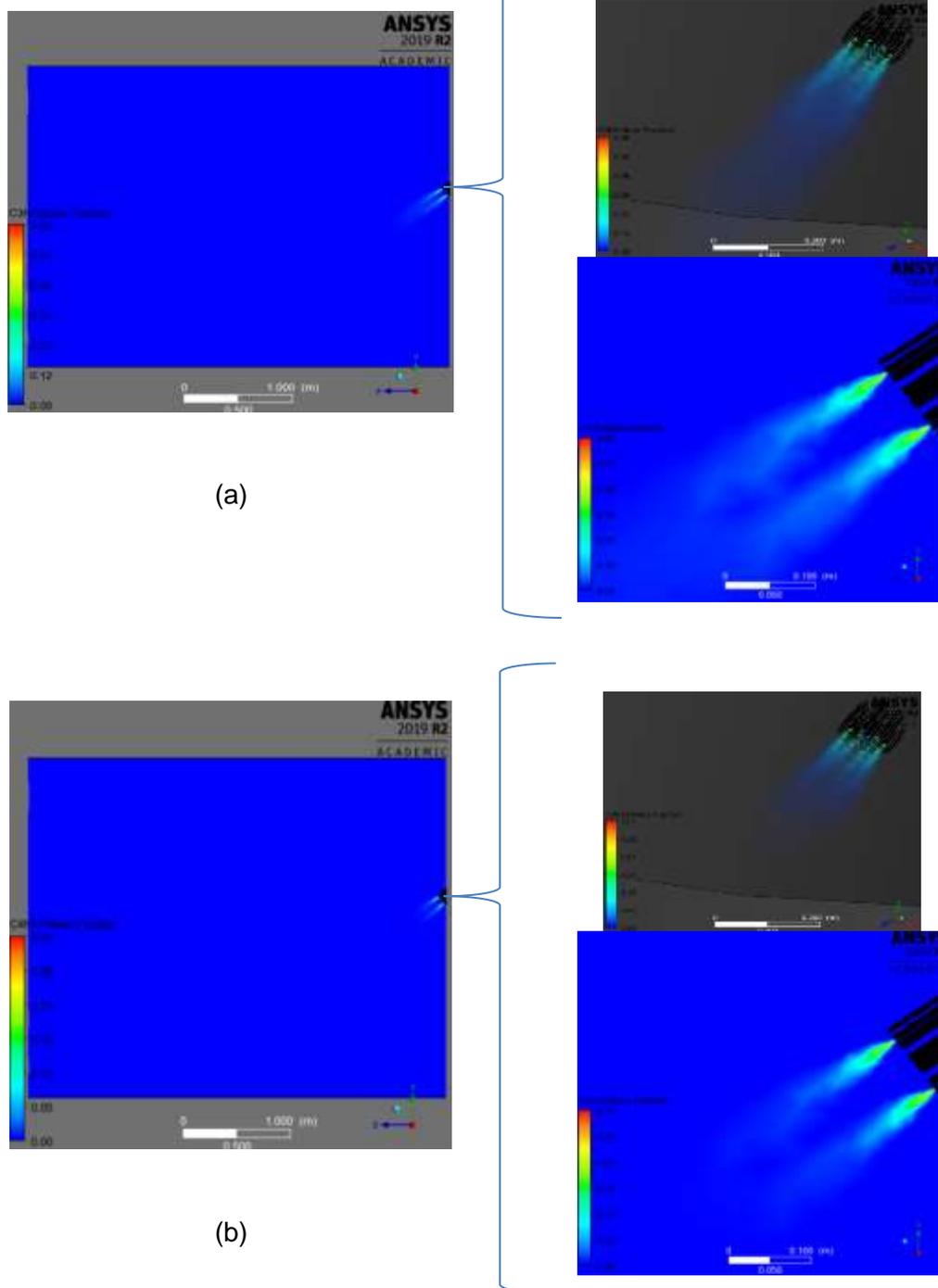
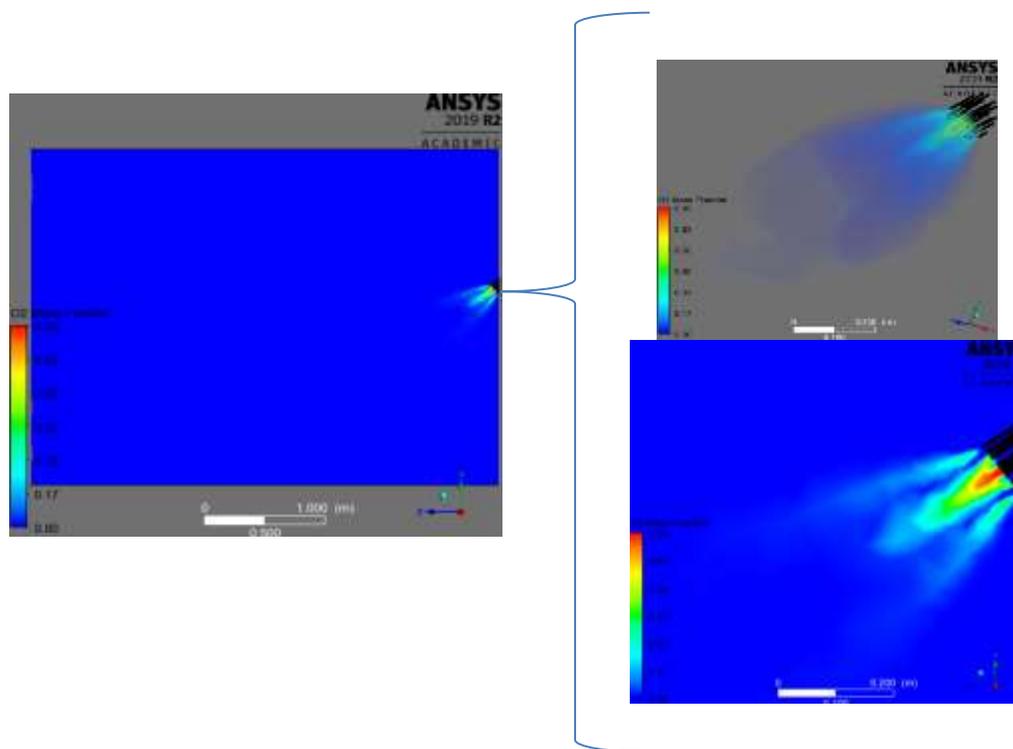
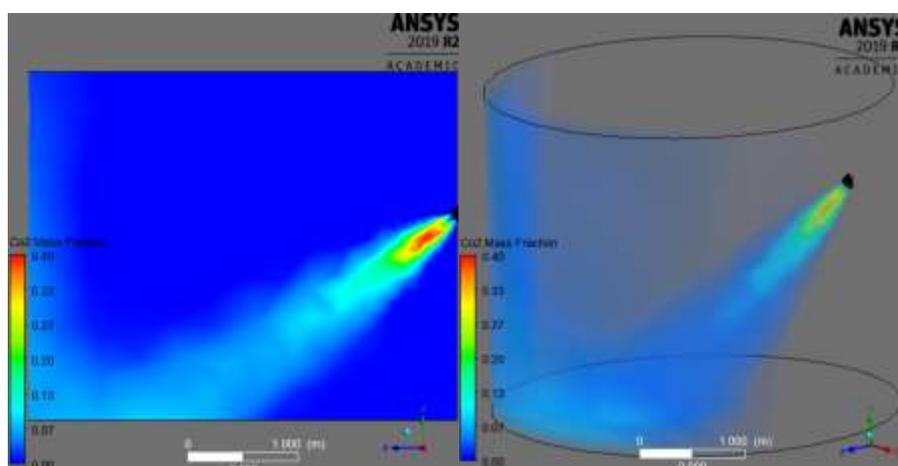


Figura 35

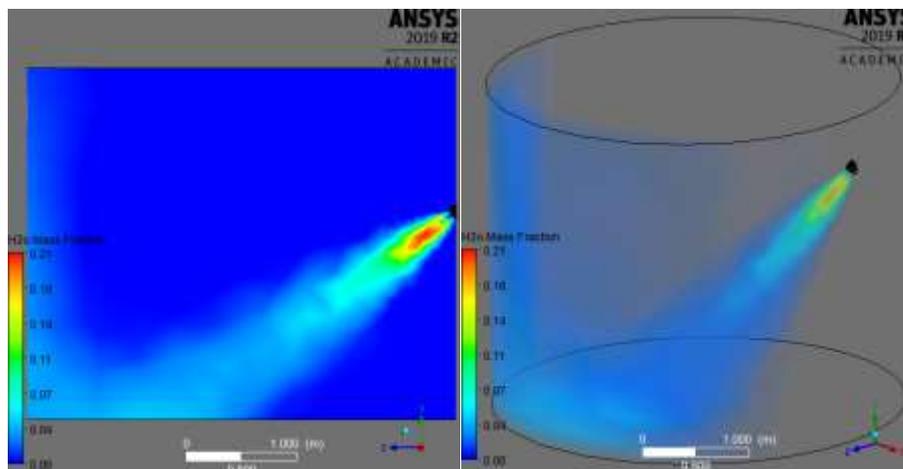
Distribución del oxígeno.

**Figura 36**

Distribución de los productos. (a) dióxido de carbono, (b) vapor de agua.



(a)



(b)

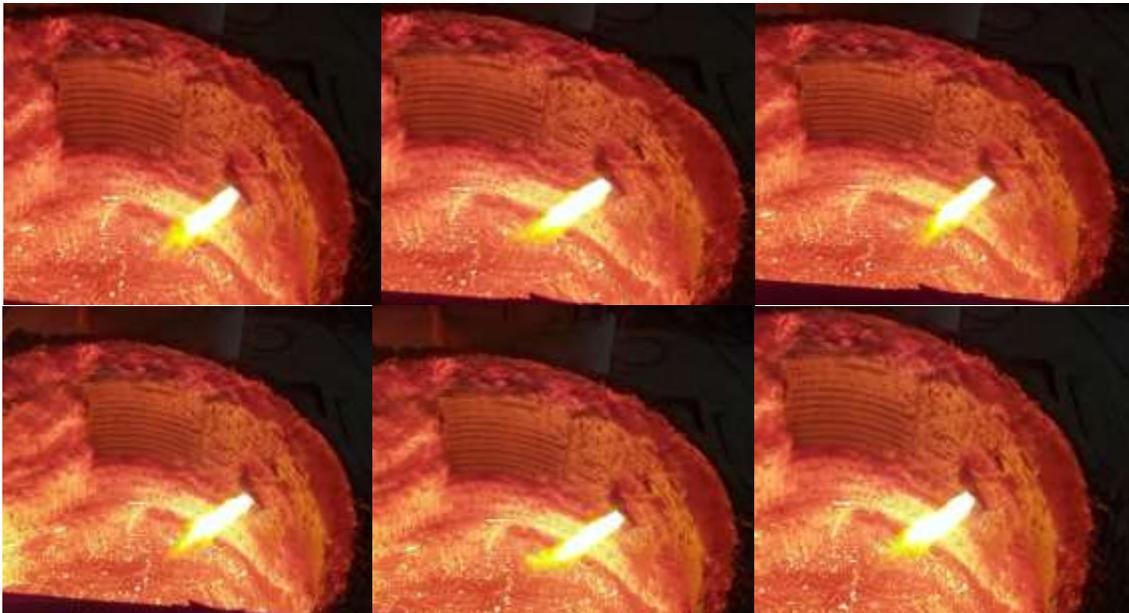
Las imágenes (a) y (b) de la Figura 34 muestran las zonas localizadas en las cuales los componentes del combustible GLP (propano y butano), de acuerdo a su proporción en la mezcla. La Figura 35 representa la manera de como el componente principal de la corriente oxidante (oxígeno) se dispersa en el espacio fluido. Mientras que las imágenes (a) y (c) de la Figura 36 muestra la distribución de los productos de la reacción, siendo dióxido de carbono y agua respectivamente y se puede observar una mayor generación de CO_2 que de H_2O . Estas imágenes abren un panorama distinto del modo de apreciar un proceso de combustión real.

4.3 Validación por visualización del proceso de combustión real (perfil 3)

Debido a que la combustión es uno de los procesos químicos más apreciables a simple vista, cuyas reacciones promueven la generación de llamas, se ha realizado simplemente una comparación visualmente de la simulación en general y la llama generada por el proceso real del perfil 3. La Figura 37 muestra las imágenes de las llamas generadas al realizar las pruebas prácticas con la relación de 5,5.

Figura 37

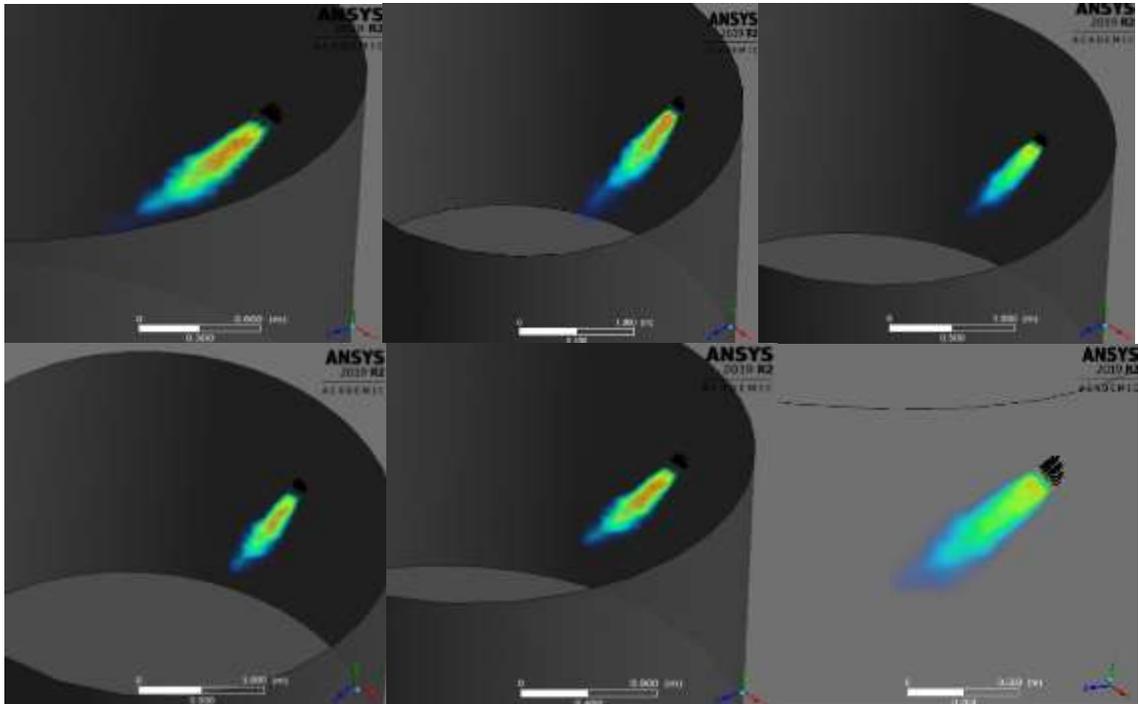
Llama del proceso real, generada con la relación de 5,5.



Se presentan a continuación imágenes generales del comportamiento del proceso de combustión simulado (Figura 38) con el fin de poderlas comparar con el proceso de combustión real.

Figura 38

Resultados generales de la simulación.



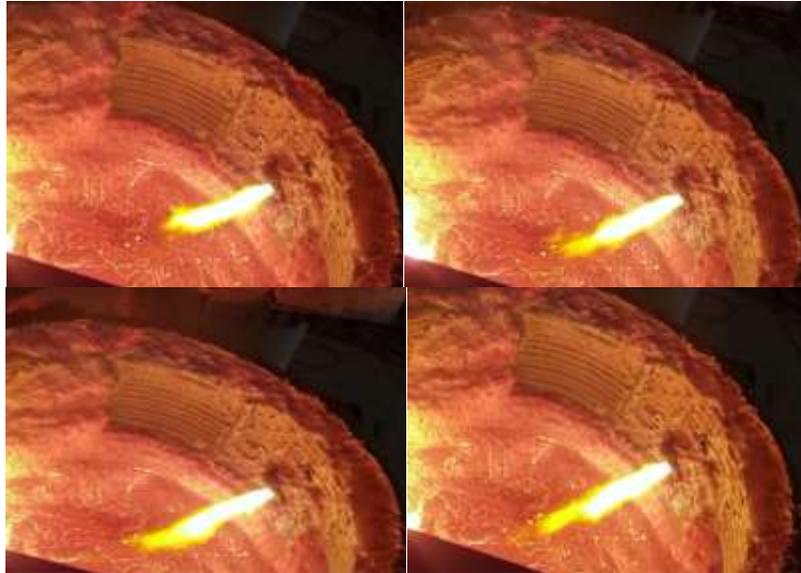
Claramente las imágenes anteriores presentan una gran similitud con la forma de la llama del proceso real, dando por hecho que la simulación en CFD es una herramienta muy versátil y que puede representar de manera práctica y didáctica mediante el modelamiento y la simulación numérica.

4.4 Discusión de la relación aire combustible propuesta y descripción de la llama generada

Con el fin de observar y documentar información acerca de los cambios visibles en las llamas generadas en el proceso real de combustión, se realizó pruebas de forma práctica de la propuesta de la relación aire-combustible. La Figura 39 muestra fotografías de la llama generada al cerrar el paso del flujo emitido por la PC y manteniendo la relación aire-combustible de 5,5.

Figura 39

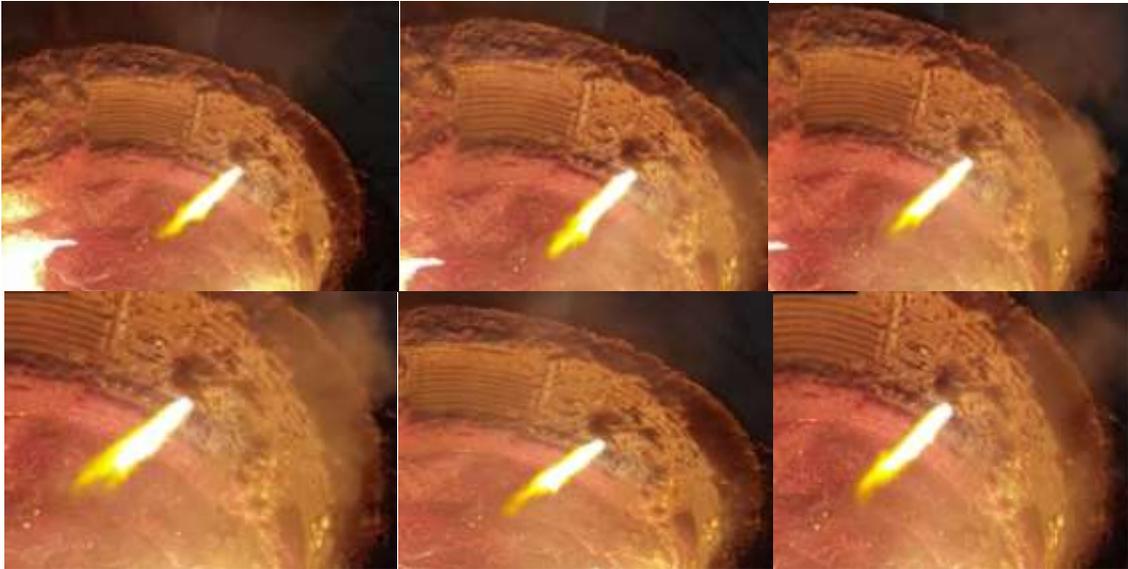
Llama generada con la relación 5,5 y sin la influencia de la PC.



Por último se ha configurado los parámetros del perfil 3 para generar la llama práctica empleando la relación 6,1 sin influencia por la PC, obteniendo las siguientes imágenes (Figura 40).

Figura 40

Llama genera por la relación 6,1 (sin flujo en PC).



La flama generada por la relación aire combustible propuesta (Figura 40) generó características, de interés para la empresa, visualmente superiores respecto a la llama generada por la relación actualmente manejada, presentando una mayor longitud, grosor reducido, buena estabilidad y acompañada de un color naranja, esta última indica que la combustión es neutra siendo estas particularidades beneficiosas para el proceso en cuestión. Estas características fueron corroboradas por el personal calificado de la empresa.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Debido a que la empresa no cuenta con un estudio formal referente a la combustión generada por los quemadores del EAF, el presente trabajo ha sido desarrollado con el fin de proporcionar información relevante para el desempeño óptimo del proceso mencionado.

Para el proceso de combustión estudiado, la relación aire-combustible es influenciada mayormente por la variación de la composición de la corriente oxidante y cuya relación es inversa al contenido de oxígeno en dicha corriente. Debido a la composición variable de oxígeno empleado en el proceso de combustión, se propone trabajar con una relación de 6,1 para el perfil 2 y 3 asumiendo una corriente oxidante que posee 88% V/V o mayor, esta relación ha sido determinada a través del estudio de la estequiometría de reacción para la composición particular de GLP, además de considerar que el enfoque del quemador está orientado al calentamiento de la chatarra, por lo que, se ha simplificado el aporte del flujo por la PC, sin embargo, también se ha analizado la influencia que genera el flujo de la PC, determinando una relación de 5,7 para los perfiles mencionados, valor cercano a la relación con la que actualmente opera la empresa, y cuyo valor es de 5,5.

Debido a la naturaleza estricta de las reacciones químicas, no es recomendable describir a la reacción de combustión del GLP como una reacción global, por lo tanto, se ha considerado que las reacciones que ocurren en el proceso de combustión estudiado, se desarrollan de manera individual para cada componente de la mezcla.

La relación oxígeno-combustible planteada, genera teóricamente ventajas termodinámicas frente a relaciones menores, puesto que, esta ha sido determinada bajo la consideración de una combustión estequiométrica para el propano y butano.

La difusión y la convección de transferencia de masa y energía, así como la turbulencia son fenómenos característicos y predominantes en el proceso de combustión estudiado, por lo tanto, se han empleado modelos robustos que permiten describir efectivamente el proceso en cuestión, tal como lo es el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. Así mismo, se ha generado una geometría similar al dominio real, siguiendo un mallado no estructurado, calificado por los parámetros de calidad como una malla buena, demostrando que el modelamiento, y en general, la técnica CFD es una excelente herramienta para realizar simulaciones de un proceso de combustión.

Dentro del análisis visual de la llama generada por la relación propuesta, se observó una mayor longitud, un grosor reducido, y una estabilidad relativamente buena, acompañada de un color anaranjado, esta última indicando que la combustión es neutra. Estas características han sido corroboradas por el personal de la empresa.

El estudio revela varias consideraciones particulares intrínsecas del proceso que se deben tomar en cuenta en un análisis de combustión, tal como el diseño quemador, el tipo de mezcla de los gases reactivos así como sus composiciones y la estequiometría dominante del proceso.

Las consideraciones que se ha realizado en el presente modelamiento simplifican varios supuestos con fines prácticos. Las condiciones medio ambientales y la interacción de la transferencia de calor con este, es una de las simplificaciones más

relevantes que se ha realizado, por estos y varias consideraciones más, la simulación presenta temperaturas similares a la de llama adiabática, reportada en bibliografía.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda el estudio de la factibilidad para el desarrollo de un control automático en línea que permita variar la relación aire-combustible de acuerdo el porcentaje de oxígeno en la corriente oxidante empleada para el proceso de combustión en los quemadores, enfocado al calentamiento de la chatarra.

Se recomienda la conservación del caudal de oxígeno (como quemador) generado por la reacción 5,5 del perfil 2 y 3, y variar el caudal de GLP de acuerdo a la relación propuesta, es decir emplear $82,95 \text{ Nm}^3/h$ de GLP para una caudal de $506 \text{ Nm}^3/h$ de oxígeno como quemador.

Analizar y estudiar la posibilidad de precalentar la corriente oxidante empleada en el proceso de combustión, puesto que existen varios estudios acerca de los beneficios de esta práctica para dicho proceso.

Analizar el efecto práctico de trabajar con un porcentaje de aire mayor al estequiométrico, debido a que el contacto entre los gases reactivos (mezclado), en un proceso real, nunca es ideal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrera, M., Castello, M., Betoret, N., & Pérez, E. (2018). Principios Básicos de la Combustión. Recuperado el 25 de julio de 2019, de <https://riunet.upv.es/handle/10251/103833>
- Blazek, J. (2015). *Computational fluid dynamics:Principles and Applications*. Butterworth-Heinemann. ELSEVIER. Recuperado el 16 de julio de 2019, <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-008044506-9/50013-8>
- Brizuela, E., & Romano, S. (2003). Combustión. *Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval Facultad de Ingeniería, UBA*.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica* (Sexta edic). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (Séptima ed). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Charles, E., & Baukal, J. (2000). *Heat transfer in industrial combustion*. Boca Raton: CRC press.
- Coveñas, J. M. (2007). Fundamentos y características generales de operación de los hornos de arco eléctrico. Recuperado el 15 de julio de 2019, de <http://repositorio.uni.edu.pe/handle/uni/9933>
- Cramb, A., & Amuda, M. (2016). Steel Production and Refining. *Reference*

- Module in Materials Science and Materials Engineering*, (October 2015), 1–13. Recuperado el 11 de julio de 2019, de <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.02528-5>
- Daood, S., Nimmo, W., Edge, P., & Gibbs, B. (2011). Deep-staged, oxygen enriched combustion of coal. *Elsevier*, 10. Recuperado el 8 de julio de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111000652>
- Dong, W. (2000). *Design of advanced industrial furnaces using numerical modeling method. Doctoral dissertation, Materialvetenskap*. Recuperado el 18 de julio de 2019, de <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:8636>
- ENEAGRID. (2009). ENEA. Recuperado el 26 de julio de 2019, de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node11.htm>
- Entrena González, F. J. (2013). *UF0566: Eficiencia energética en las instalaciones de calefacción y ACS en los edificios*. IC Editorial.
- Escuela Colombiana de Ingeniería. Curso de procesos de manufactura - Fundición (2008). Recuperado el 4 de agosto de 2019, de https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/9627_fundicion.pdf
- Esquerra Pizá, P. (1988). *Dispositivos y sistemas para el ahorro de energía. PRODUCTICA*. Marcombo.
- Francis, W., & Peters, M. (2013). Fuels and fuel chemistry. En *Pounder's Marine*

- Diesel Engines* (pp. 427–439). Elsevier. Recuperado el 11 de agosto de 2019, <https://doi.org/10.1016/b978-0-408-01136-5.50029-4>
- Guerra, E. T., & Berciano, J. E. (2009). Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte I Acería Eléctrica. Recuperado el 15 de julio de 2019, de http://oa.upm.es/1929/1/Aceria_electrica_MONO_2009.pdf
- Issouribehere, F., Agüero, J. L., & Battaiotto, P. E. (2007). Diseño de un STATCOM para la mitigación del flicker producido por hornos de arco eléctrico. Recuperado el 19 de julio de 2019, de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/36808>
- Kreith, F., Manglik, R., & Bohn, M. (2011). *Principles of Heat Transfer*. Cengage Learning ©.
- Maron, S., & Prutton, C. (1993). *Fundamentos de fisicoquímica*. México, D.F.: Editorial LIMUSA, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores.
- Mavainsa, R. (2011). Combustión. Recuperado el 6 de julio de 2019, de http://www.mavainsa.com/pdfs/3_combustion.pdf
- Monje Jingo, C. F. (2017). *Modelo numérico de un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el software Ansys CFX y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM*. Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 18 de agosto de 2019, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18869>

- Moran, M., & Shapiro, H. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica* (Segunda ed). John Wiley & Sons, Inc.
- Moran, M., & Shapiro, H. (2008). *Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Múnera, A., Arrieta, A., & Sierra, J. (2009). Numerical models for the phenomenological study of flameless combustion. *Redalyc*, 29(2), 70–76. Recuperado el 20 de julio de 2019, de <http://www.scielo.org.co/img/revistas/iei/v29n2/v29n2a11>
- Occupational Safety and Health Administration. (1993). Liquefied petroleum gas (LP-Gas). Recuperado el 4 de agosto de 2019, de <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.153>
- San José, R. (2001). Combustion y Combustibles. *Trabajo de grado de Maestría*. Recuperado el 18 de julio de 2019, de http://www.academia.edu/download/32606588/Combustion_y_combustibles.pdf
- Skeen, S., Yablonsky, G., & Axelbaum, R. (2009). Características de la combustión mejorada con oxígeno no premezclado: I. La presencia de oxígeno apreciable en la ubicación de la temperatura máxima. *Combustión y llama*. Recuperado el 21 de julio de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218009001977>

- Suárez, L. (2013). *Ahorro Energético en hornos tipo túnel, que operan con GLP. Bachelor's thesis*. Recuperado el 17 de julio de 2019, de <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.7.041008>
- Tsuji, H., Gupta, A., Hasegawa, T., Kishimoto, K., & Morita, M. (2003). *High temperature Air Combustion From Energy Conservation to Pollution Reduction*. CRC Press LLC.
- Versteeg, H., Malalasekera, W., Orsi, G., Ferziger, J. H., Date, A. W., & Anderson, J. D. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. Fluid flow handbook*. McGraw-Hill. Educación Pearson. Recuperado el 2 de agosto de 2019, de <https://doi.org/10.2514/1.22547>
- Virella, A. (1961). Combustión y combustibles. *materconstrucc.revistas.csic.es*, 9–50. Recuperado el 23 de julio de 2019, de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1890>
- Wark, J., & Donald, R. (2001). *Termodinámica* (Sexta Edic). McGraw-Hill Inc.
- Yang, W., & Blasiak, W. (2006). CFD as applied to high temperature air combustion in industrial furnaces. *IFRF Combustion Journal*, 1–22. Recuperado el 8 de julio de 2019, de <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21396638>

ANEXOS