

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**AHORRO ENERGÉTICO EN HORNOS TIPO TÚNEL, QUE OPERAN
CON GLP**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

LUCÍA VANNESA SUÁREZ BASTIDAS
vns.suarez@gmail.com

DIRECTORA: ING. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS
lucia.montenegro@epn.edu.ec

Quito, octubre 2013

© Escuela Politécnica Nacional 2013
Reservados todos los derechos de producción

DECLARACIÓN

Yo Lucía Vannesa Suárez Bastidas, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Lucía Vannesa Suárez Bastidas

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Lucía Vannesa Suárez Bastidas bajo mi supervisión.

Ing. Lucía Montenegro
DIRECTORA DEL PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero de la empresa EDESA S.A. y se ejecutó en la planta de operación de la misma ubicada en la Av. Morán Valverde Oe3-191 y Av. Quitumbe Ñan, sector Chillogallo.

AGRADECIMIENTO

A Papito Dios, por estar siempre conmigo en todo momento, levantándome, apoyándome y dándome su bendición, por ser quien levanta mi cabeza y me lleva de gloria en gloria con su eterno amor.

A mis padres y mi hermano Hugo, mis mejores amigos, por su paciencia, su abnegación y amor, porque sus oraciones me han sostenido a lo largo de mi vida y nunca han dejado de creer en mí.

A toda mi familia, mis tíos y mis primos, en especial a mi prima Nathy por ser más que mi hermana, mi mejor amiga en las buenas y en las malas.

A la empresa EDESA S.A. por darme la oportunidad de poner en práctica mis conocimientos adquiridos a lo largo de mi carrera como estudiante.

A la Ing. Lucía Montenegro, por su apoyo, paciencia y sabios consejos que durante todo este tiempo me han sabido impartir.

A todos los profesores que durante mi carrera universitaria han sabido ser más que mentores, grandes amigos, Ing. Mario Sánchez, Ing. Fernando Buchelli, Ing. Marcelo Almeida, Ing. Marcelo Albuja, Ing. Oswaldo Proaño y a Don Carlitos por ser siempre un gran amigo.

A la Dra. Jessica Guarderas y a ASFORUM, por ser verdaderos amigos y demostrarme siempre su apoyo y afecto.

DEDICATORIA

A mis padres y mi hermano Hugo, el regalo más grande que el Señor me ha dado,
por todo el amor que me dan día a día y por ser mis mejores amigos que me
apoyan y alientan en todo momento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Leyes de la Termodinámica	1
1.1.1 Primera ley de la Termodinámica	1
1.1.2 Segunda ley de la Termodinámica	3
1.2 Combustión	4
1.2.1 Combustibles	5
1.2.2 Tipos de combustión	9
1.2.2.1 Combustión completa	9
1.2.2.2 Combustión incompleta	9
1.2.2.3 Combustión estequiométrica o teórica	10
1.2.2.4 Combustión con exceso de aire	10
1.2.2.5 Combustión con defecto de aire	10
1.2.3 Eficiencia de combustión	11
1.2.4 Aire de combustión	12
1.2.4.1 Relación aire/combustible	12
1.2.4.2 Exceso de aire	13
1.2.4.3 Curva combustión-exceso de aire	14
1.2.5 Ventajas de los combustibles gaseosos	15
1.2.6 Quemadores	17
1.2.6.1 Quemadores de tiro natural	19
1.2.6.2 Quemadores de tiro forzado	20
1.2.6.3 Criterios de operación para el quemador	21
1.2.7 Calor disponible y eficiencia del proceso	21
1.2.8 Control de la mezcla en el quemador	23
1.2.9 Gas licuado de petróleo	25
1.2.9.1 Propiedades del GLP	28
1.2.9.2 Producción del GLP a nivel mundial	29
1.2.9.3 Consumo de GLP en el Ecuador	30
1.3 Hornos cerámicos tipo túnel	31
1.3.1 Estructura de los hornos tipo túnel	32
1.3.1.1 Operación de los hornos	33
1.3.1.2 Visualización de la llama	35
1.3.1.3 Mantenimiento de los quemadores	37
1.4 Ahorro energético	38
1.4.1 Parámetros de operación en un horno que opera con GLP	40
1.4.2 Características de diseño	41

1.4.3	Medidas particulares a tomar	42
1.4.4	Objetivos de la operación del horno	43
2.	METODOLOGÍA	45
2.1	Diagnóstico inicial de las condiciones de operación del horno tipo túnel	45
2.1.1	Acondicionamiento de los puertos de muestreo	45
2.1.2	Características del equipo de medición	47
2.1.3	Toma de datos de la velocidad	48
2.1.4	Cálculo de los flujos volumétricos y másicos	50
2.1.5	Determinación de la cantidad de exceso de aire	51
2.2	Determinación de las condiciones técnicas necesarias para mejorar la operación del horno	52
2.2.1	Consideraciones de operación para el horno	53
2.2.2	Medición de los gases de combustión	53
2.2.3	Medición de la eficiencia de la combustión	54
2.2.3.1	Balance de energía del horno de quema de cerámicos	55
2.2.3.2	Calor absorbido por el producto	56
2.2.3.3	Calor perdido hacia el ambiente	56
2.2.3.4	Calor perdido por radiación	58
2.2.3.5	Calor transportado por los gases de combustión	59
2.2.3.6	Cálculo de la eficiencia de la combustión	59
2.3	Implementación de las medidas de ahorro energético	60
2.3.1	Mediciones realizadas para el diagnóstico final de las condiciones de operación del horno	62
2.4	Estudio económico del proyecto	63
2.4.1	Consumo energético del horno de quema de cerámicos	63
2.4.2	Beneficios de operación del horno	64
2.4.2.1	Costo de operación del horno	64
2.4.2.2	Beneficio/Costo de la operación del horno	65
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
3.1	Diagnóstico inicial de las condiciones de operación del horno tipo túnel	66
3.1.1	Ubicación de los puertos de muestreo	66
3.1.2	Cálculo del flujo másico de aire utilizado durante la combustión	68
3.1.3	Control de las condiciones de ingreso de los flujos al quemador	74
3.1.3.1	Cálculo de la relación aire/combustión	78
3.1.3.2	Cálculo del consumo teórico y real de aire para la combustión	79
3.1.4	Calibración de los flujos de aire y GLP que ingresan a los quemadores	80
3.1.5	Resultados del balance de energía en el horno de quema de cerámicos	84
3.1.5.1	Calor absorbido por el producto	85
3.1.5.2	Calor perdido hacia el ambiente	86
3.1.5.3	Calor perdido por radiación	88
3.1.5.4	Calor transportado por los gases de combustión	89
3.1.5.5	Cálculo de la eficiencia de la combustión	90

3.2	Resultados de las condiciones técnicas necesarias para mejorar la operación del horno	91
3.2.1	Medidas alternativas para el precalentamiento del aire que ingresa a los quemadores	91
3.2.2	Resultados del calor generado por la instalación de la resistencia eléctrica	92
3.3	Diagnóstico final de la implementación de las medidas de ahorro energético	94
3.3.1	Nuevas condiciones de velocidad en cada zona de aire	97
3.3.2	Flujo volumétrico a las condiciones finales	98
3.3.3	Resultados de la determinación del consumo de aire en el proceso	100
3.3.4	Resultados del monitoreo de los gases de combustión	101
3.3.5	Balance de energía final	104
3.3.5.1	Calor perdido por radiación	104
3.3.5.2	Calor transportado por los gases de combustión	104
3.3.5.3	Balance de energía final en el horno	105
3.4	Resultados del estudio económico del proyecto	106
3.4.1	Costos del GLP necesarios para la combustión en el horno tipo túnel	107
3.4.2	Costos de la niquelina utilizada para el precalentamiento del aire de combustión	107
3.4.3	Costos energéticos para que se realice la combustión	108
3.4.4	Análisis Beneficio/Costo del proyecto	109
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
4.1	Conclusiones	111
4.2	Recomendaciones	112
	BIBLIOGRAFÍA	114

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Poder calórico de algunos combustibles gaseosos a las condiciones de 1 atm y 25 °C de temperatura	7
Tabla 1.2.	Densidad de algunos compuestos gaseosos utilizados a nivel industrial	8
Tabla 1.3.	Relación estequiométrica de los combustibles más utilizados en procesos industriales	13
Tabla 1.4.	Poder calorífico de los combustibles de mayor demanda a nivel industrial en el Ecuador a las condiciones de 1 atm de presión y 25 °C de temperatura	16
Tabla 1.5.	Composición del GLP en el Ecuador	26
Tabla 1.6.	Propiedades del GLP a 16 °C	26
Tabla 1.7.	Excesos de aire recomendados para lograr una buena combustión en el hogar	43
Tabla 2.1.	Valores de las constantes de la ecuación de velocidad para el aire	50
Tabla 2.2.	Dimensiones del horno de quema de cerámicos	57
Tabla 3.1.	Datos de la chimenea en el horno de quema de cerámicos	68
Tabla 3.2.	Resultados del cálculo de la velocidad del aire consumido en el horno tipo túnel a condiciones iniciales	69
Tabla 3.3.	Resultados de las mediciones de los componentes de los gases de combustión durante el diagnóstico inicial de operación del horno	70
Tabla 3.4.	Área transversal en cada zona del horno	72
Tabla 3.5.	Resultados del cálculo del flujo volumétrico del aire al inicio del proyecto	72
Tabla 3.6.	Resultados del cálculo del flujo másico del aire al inicio del proyecto	73
Tabla 3.7.	Resultados de la visualización de la llama del quemador de prueba	77
Tabla 3.8.	Cálculos de los pesos de los componentes de la ecuación estequiométrica de combustión	78

Tabla 3.9.	Datos de la fuente fija de combustión (chimenea) en el horno de quema de cerámicos	79
Tabla 3.10.	Datos experimentales de la modificación de los flujos de aire y GLP que ingresaban a los quemadores para su combustión	80
Tabla 3.11.	Datos obtenidos del monitoreo en la chimenea a condiciones iniciales y durante la calibración de los quemadores	82
Tabla 3.12.	Propiedades de las piezas cerámicas que ingresan al horno por carga	86
Tabla 3.13.	Datos experimentales de las condiciones de las paredes del horno	87
Tabla 3.14.	Propiedades de los gases de combustión	88
Tabla 3.15.	Valores de calor específico de los gases de combustión a 112,9 °C	89
Tabla 3.16.	Resultados de los calores generados y absorbidos durante el proceso de combustión en el horno de quema de cerámicos	90
Tabla 3.17.	Coefficientes de resistividad de algunos sólidos a 25 °C	93
Tabla 3.18.	Composición de los gases de combustión luego de las modificaciones	97
Tabla 3.19.	Resultados obtenidos del cálculo de la velocidad del aire a condiciones finales	97
Tabla 3.20.	Resultados obtenidos del cálculo del flujo volumétrico del aire luego de precalentar el aire que ingresa a los quemadores	99
Tabla 3.21.	Flujo másico del aire en los ductos de entrada y salida luego de las modificaciones	100
Tabla 3.22.	Resultados de la eficiencia de la reacción al inicio del proyecto y luego de la implementación de la niquelina al quemador	101
Tabla 3.23.	Datos obtenidos del monitoreo en la chimenea a condiciones finales y durante la calibración de los quemadores	102
Tabla 3.24.	Valores de calor específico de los gases de combustión a 118,7 °C	105
Tabla 3.25.	Resultados de los calores generados y absorbidos durante el proceso de combustión en el horno de quema de cerámicos a condiciones finales	106
Tabla 3.26.	Costos de las piezas cerámicas que ingresan al horno	109

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Triángulo de la combustión	4
Figura 1.2.	Curva combustión-exceso de aire	14
Figura 1.3.	Precios de los combustibles más utilizados a nivel industrial en el país	16
Figura 1.4.	Cámara del horno de quema de cerámicos donde se realiza el proceso de combustión	18
Figura 1.5.	Esquema de un quemador de tiro natural	19
Figura 1.6.	Esquema de un quemador de tiro forzado	20
Figura 1.7.	Porcentaje de calor disponible respecto al poder calorífico superior como función de la temperatura de los gases de combustión y el exceso de aire	22
Figura 1.8.	Eficiencia de combustión vs. temperatura de productos y exceso de aire	24
Figura 1.9.	Representación gráfica del almacenamiento del GLP	27
Figura 1.10	Producción mundial del GLP	29
Figura 1.11.	Consumo mundial de GLP	30
Figura 1.12.	Tren de carro sobre ruedas que transporta a las piezas cerámicas a lo largo del horno tipo túnel	32
Figura 1.13.	Revisión de las piezas antes de ingresar al horno cerámico	33
Figura 1.14.	Esquema de un horno tipo túnel	34
Figura 1.15.	Llama proveniente del quemador encendido	35
Figura 1.16.	Interpretación del estado de la combustión a través de la visualización de la llama	36
Figura 1.17.	Interpretación del tipo de combustión en función de los gases de combustión	37
Figura 2.1.	Esquema de las zonas de entrada y salida de aire en un horno tipo túnel	46

Figura 2.2.	Plataforma de trabajo para el monitoreo de los gases de combustión	47
Figura 2.3.	Equipo utilizado para la toma de medidas de emisiones industriales	48
Figura 2.4.	Representación gráfica del sensor de O ₂ utilizado en el Testo 335	48
Figura 2.5.	Tubo Pitot que permite medir la presión en los flujos de aire	49
Figura 2.6.	Diagrama para determinar el factor de forma (S)	58
Figura 2.7.	Dimensiones de la resistencia eléctrica utilizada para precalentar el aire que ingresa al quemador en el horno de quema de cerámicos	60
Figura 3.1.	Puerto de muestreo para el aire de atomización	66
Figura 3.2.	Chimenea para el monitoreo de los gases de combustión	67
Figura 3.3.	Balance de masa de las entradas y salidas de aire al horno de quema de cerámicos	73
Figura 3.4.	Manómetro ubicado a la entrada del quemador	75
Figura 3.5.	Análisis visual de la llama de aislamiento	76
Figura 3.6.	Visualización de la coloración de la llama	77
Figura 3.7.	Manómetro ubicado a la entrada del quemador	81
Figura 3.8.	Concentración del CO que forma parte del gas de combustión	83
Figura 3.9.	Concentración del CO ₂ que forma parte del gas de combustión	83
Figura 3.10.	Balance de energía en el horno de quema de cerámicos	84
Figura 3.11.	Variaciones de temperatura dentro del horno de quema de cerámicos	85
Figura 3.12.	Adecuación de niquelina al quemador de prueba	91
Figura 3.13.	Pinza amperimétrica conectada a la entrada del quemador	92
Figura 3.14.	Mangueras para la entrada de aire y de combustible al quemador	94
Figura 3.15.	Concentración de CO con relación a la presión de aire que ingresa al quemador luego de las modificaciones	95
Figura 3.16.	Salida de las piezas del horno cerámico	96

Figura 3.17.	Concentración del CO que forma parte del gas de combustión	103
Figura 3.18.	Concentración del CO ₂ que forma parte del gas de combustión	103
Figura 3.19.	Eficiencia de combustión bajo condiciones iniciales y finales	106

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Planos del horno de quema de cerámicos donde se realizó el proyecto de titulación	119
ANEXO II	
Ejemplo de cálculo de la velocidad promedio en el ducto o chimenea	121
ANEXO III	
Velocidad de los flujos de aire en la entrada y salida del horno	123
ANEXO IV	
Ordenanza 213, resolución 0001-SA-2010, literal 5.2	135
ANEXO V	
Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS), capítulo VI, anexo III	136

GLOSARIO

Chimenea.- Conducto que facilita el transporte hacia la atmósfera de los productos de combustión generados en la fuente fija.

Contaminación del aire.- Es la presencia de sustancias en la atmósfera, que resultan de actividades humanas o de procesos naturales, presentes en concentración suficiente, por un tiempo suficiente y bajo circunstancias tales que interfieren con el confort, la salud o el bienestar de los seres humanos o del ambiente.

Contaminante del aire.- Cualquier sustancia o material emitido a la atmósfera, sea por actividad humana o por procesos naturales, y que afecta adversamente al hombre o al ambiente.

Exceso de aire (λ).- Es el aire en exceso que se introduce a la cámara para asegurar que las moléculas de combustibles estén rodeadas por suficiente aire de combustión.

Fuente fija de combustión.- Es aquella instalación o conjunto de instalaciones colocadas en un sistema, que tienen como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, y que emiten o pueden emitir contaminantes al aire, debido a los procesos de combustión, desde un lugar fijo o inamovible.

Monitoreo.- Es el proceso programado para coleccionar muestras, efectuar mediciones, y realizar el subsiguiente registro, de varias características del ambiente, a menudo con el fin de evaluar conformidad con objetivos específicos.

Puerto de muestreo.- Son los orificios circulares que se hacen en las chimeneas o conductos para facilitar la introducción de los elementos necesarios para mediciones y toma de muestras.

Puntos de medición.- Son puntos específicos, localizados en las líneas de muestreo, en los cuales se realizan las mediciones y se extrae la muestra respectiva.

Quemador.- Componente donde se combina el combustible con el aire, preparándolos para la combustión.

Temperatura de combustión.- Es la temperatura máxima de la llama que se alcanza durante el proceso de combustión (García, 2001, pág. 3).

Tubo Pitot.- es un medidor de velocidad de flujo.

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se analizó el ahorro energético en el horno de quema de cerámicos que opera con gas licuado de petróleo (GLP); para esto se inició con el balance de masa del proceso, con la finalidad de conocer el flujo de aire real que ingresaba a la combustión y luego, tomando en cuenta la ecuación estequiométrica de reacción del GLP se obtuvo la relación teórica necesaria: 6,88 kg aire/kg combustible, de esta manera se determinó que el flujo másico real de combustible era de 78,49 kg/h y al mismo tiempo se llevó un control de la concentración de contaminantes a la atmósfera.

Luego del diagnóstico inicial del horno, se regularon los flujos de aire y GLP en los quemadores y se determinó el aporte energético real producido durante el proceso, que fue de 353,16 kW considerando todas las posibles formas de calor que se puedan estar generando o saliendo durante el funcionamiento del horno.

Bajo estos conocimientos y tomando en cuenta que el precio del kWh en el Ecuador a partir del año 2011 es de 8,97 USD/kWh, se determinó que el funcionamiento del horno de quema de cerámicos le costaba inicialmente a la empresa 76 028,28 USD/mes de energía eléctrica y 55 382,54 USD/mes del combustible debido a que el precio del GLP es de 0,98 USD/kg ya que al ser su uso industrial su costo está en función de la oferta y demanda.

Posteriormente se estableció como alternativa para disminuir el consumo de combustible y energía en el proceso el precalentamiento del aire que ingresaba a la combustión, para lo cual se adaptó una resistencia eléctrica a un quemador de prueba con la finalidad de calentar el aire antes de su ingreso al quemador para conseguir una mejor reacción; luego de instalada dicha resistencia eléctrica se retomó la calibración de los quemadores y la medición de la concentración de los gases de combustión hasta lograr un equilibrio entre los flujos de aire, combustible y la concentración de contaminantes, como en el caso del CO que disminuyó su concentración de 77 ppm (138,77 mg/Nm³ con 18,91 % O₂) a 61 ppm (64,4 mg/Nm³ con 17,45 % O₂), cumpliendo además con la Ordenanza 213

indicada en el Anexo IV, resolución 0001-SA-2010, literal 5.2, Tabla 1 que estipula que la emisión máxima permisible del CO a la atmósfera para fuentes fijas debe ser de 100 mg/Nm³.

Adicionalmente la eficiencia de la combustión pasó de 77,13 % a 78,79 % permitiendo además disminuir el exceso de aire generado por la reacción de 503,21 % a 414,70 %. Debido al precalentamiento del aire que ingresaba a los quemadores, el consumo de GLP disminuyó a 52,40 kg/h, con un ahorro de 18 409,10 USD/mes y una disminución del gasto energético a 183 848,53 USD/mes pero considerando que el costo del consumo de energía por parte de la resistencia eléctrica para los 28 quemadores del horno sería de 375 229,78 USD/mes, este costo final fue mayor al costo inicial.

Por lo tanto se determinó que la mejor opción para el ahorro energético es el precalentamiento del aire que ingresa al quemador, para lo cual se puede optimizar la utilización de recursos viendo la factibilidad de recircular el aire caliente recuperado del mismo proceso con la finalidad de no requerir la utilización de energía externa que no haga factible un ahorro real de energía debido a los costos.

INTRODUCCIÓN

El ahorro energético en la actualidad se plantea en términos de rendimiento energético y de rendimiento económico, ya que resulta más barato ahorrar un litro de petróleo que obtenerlo debido a los procesos que se utilizan para su explotación.

Uno de los derivados del petróleo es el GLP, el cual debido a la mejor utilización de sus propiedades y a la emisión de menos contaminantes, se ha vuelto más competitivo en el país en los sectores industrial, comercial y doméstico, frente al uso de otros combustibles líquidos como el búnker y diesel, que a pesar de ser más económicos tienen mayor afectación a la atmósfera.

Esto se da debido a la cadena de carbono de la que están formados y a la posible producción de hollín, materiales inquemados o a las altas concentraciones de contaminantes emitidos a la atmósfera si la reacción producida es incompleta, conjuntamente con los costos energéticos que representan debido a que al ser líquidos requieren otros procesos agregados para producir su atomización antes de poder formar parte de la reacción de combustión.

Sin embargo, a nivel industrial, el consumo de GLP todavía sigue siendo restringido debido a los costos que representa su utilización ya que en el país no existe un subsidio a nivel de las grandes industrias y por lo tanto, sus precios dependen de la oferta y demanda y dependen también de la relación beneficio/costo que represente su utilización.

Por lo tanto, una de las alternativas propuestas para el ahorro energético en los procesos que requieran la utilización de combustibles por ejemplo combustión calentamiento, es el precalentamiento del aire que ingresa a los quemadores, lo que nos permitirá realizar la caracterización de rendimiento energético del horno para poder optimizar el uso de energía y optimizar recursos y junto con ello, disminuir el consumo de combustible y al mismo tiempo disminuir la emisión de gases de combustión a la atmósfera.

El presente proyecto es de interés de la empresa productora de cerámicos, no solo a nivel económico sino también a nivel social y ambiental, ya que presenta una respuesta a la disminución de gases contaminantes como son el CO (monóxido de carbono) y NO_x (óxidos de nitrógeno) para un mejoramiento de la calidad del aire ambiental en la ciudad de Quito y al correcto uso de combustible, en este caso GLP (gas licuado de petróleo) proporcionando además un ahorro de recursos y de consumo de energía durante la producción debido a que si se aprovecha de mejor manera el calor generado por la combustión dentro del horno, este requiere menos consumo de energía eléctrica en el proceso y el aire resultante de la combustión lleva consigo menos carga de contaminantes.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 LEYES DE LA TERMODINÁMICA

En la actualidad, existe un gran interés a nivel mundial por encontrar alternativas que permitan un mejor aprovechamiento de la energía producida por las actividades económicas (electricidad, calefacción, combustión, refrigeración, entre otras) y que sirvan para optimizar su uso, siendo importante conocer las leyes que rigen su transformación (Zemansky y Van Ness, 1992, p. 71).

Estas leyes pueden aplicarse a todo proceso en el que se produzcan transformaciones de una forma de energía a otra, como por ejemplo en una reacción química o en el paso de energía calórica de un cuerpo a otro para poder cuantificarlas y aprovecharlas de mejor manera y se conocen como las Leyes de la Termodinámica (Zemansky y Van Ness, 1992, p. 72).

1.1.1 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Esta ley se conoce también como el principio de la conservación de la energía y es importante dentro de la explicación del presente proyecto de titulación debido a que permite desarrollar conceptos básicos que se relacionan directamente ya que establece que si se realiza algún trabajo en un sistema o este intercambia calor con otro, la energía interna del sistema cambiará pero no desaparecerá, es decir, considera que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma (Abbott y Vanness, 1991, pp. 1-3).

Energía Interna

Todo sistema termodinámico posee una propiedad característica que se conoce como energía interna, la cual puede ser aumentada desde el exterior por alguna

cantidad de calor (Q) que sea absorbido por el sistema o por el trabajo exterior (W) que el medio realice sobre él. Dicha energía se encuentra asociada al movimiento de los átomos y moléculas que conforman la materia y por lo tanto depende de su estado, es decir que cuando un sistema transfiere materia o energía a su alrededor algo cambia en su interior; en el caso de una reacción química al introducir calor, se modifica su estructura molecular (Munson, Young y Okiishi, 2002, pp. 17-18).

Calor

Es la energía que se puede transferir de un cuerpo a otro como resultado de la diferencia de temperatura y ocurre desde un cuerpo con mayor temperatura hacia otro con menor temperatura mientras se encuentran en contacto o también suele darse desde diferentes partes de un mismo cuerpo, manteniéndose hasta que ambos se encuentren en equilibrio térmico (Molina, 1984, p. 66).

Es importante tener en cuenta que los cuerpos no tienen calor, sino energía interna, por lo tanto, cuando una parte de esta energía se transfiere de un sistema hacia otro que se halla a distinta temperatura, se habla de calor ya que las moléculas que lo componen se mueven con mayor intensidad chocando entre ellas e incrementando la energía de movimiento (Passamai, 1993, p. 19; Abbott y Vanness, 1991, p. 35).

Calor sensible

Es la cantidad de calor necesario que recibe un cuerpo para incrementar su temperatura sin afectar a su estructura molecular y por lo tanto a su estado de agregación, siendo directamente proporcional a la masa del cuerpo, a la diferencia de temperaturas y con una constante de proporcionalidad conocida como calor específico que es diferente para cada sustancia y se representa mediante la Ecuación [1.1](Passamai, 1993, p. 19):

$$Q_s = \Delta H = m \times C_p \times (T_f - T_i) \quad [1.1]$$

Donde:

ΔH : entalpía del sistema (kJ)

m : masa del cuerpo (kg)

C_p : calor específico a presión constante (kJ/kg *°C)

T_i : temperatura inicial del cuerpo (°C)

T_f : temperatura final del cuerpo (°C)

1.1.2 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

El segundo principio de la termodinámica determina la dirección o el sentido en el cual se va a dar la transmisión de calor, se aplica únicamente a estados de equilibrio y puede ser invertida únicamente introduciendo trabajo del medio; por lo tanto, esta ley manifiesta que en la práctica, todos los procesos como por ejemplo la combustión o la transmisión de calor de un cuerpo caliente a uno frío, son irreversibles (Passamai, 1993, p. 26).

Trabajo

Es una interacción de energía relacionada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia o camino y representa un intercambio de energía entre un sistema y el entorno que le rodea, es decir, se habla de producción de trabajo cuando el sistema sufre una transformación que puede afectar a su entorno y producir un desplazamiento de las fuerzas que ejerce este sobre el sistema (Valderrama, 2012, p. 1).

Entropía

Es una magnitud física que permite determinar la parte de la energía del proceso

que no puede utilizarse para producir trabajo, es una función de estado y describe la irreversibilidad de los sistemas termodinámicos (Valderrama, 2012, pág. 1).

1.2 COMBUSTIÓN

Es una reacción de oxidación exotérmica que permite la transformación de la materia debido al aporte de la energía de activación en presencia del oxígeno como comburente y del combustible, representados en el denominado triángulo de la combustión que se puede apreciar en la Figura 1.1; por lo tanto, si falta alguno de estos elementos, la combustión no puede llevarse a cabo (Mavainsa, 2011, p. 2).

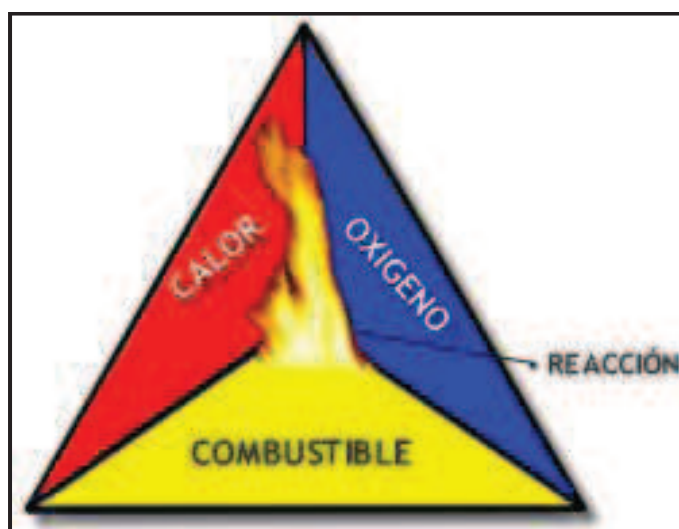


Figura 1.1 Triángulo de la combustión

La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión y en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos (Mavainsa, 2011, p. 2).

En los hornos de quema de cerámicos por lo tanto, no interesa tener una combustión perfecta, sino más bien aprovechar la eficiencia de la misma en el proceso de quema de cerámicos, para lo cual se debe prestar atención a los siguientes puntos para que sea posible una buena reacción:

- a) Si se tiene un combustible líquido como por ejemplo diesel o búnker, es necesario atomizarlo previamente para su combustión.
- b) Hay que asociar el aire y el combustible en las proporciones adecuadas en el momento y temperatura correctos para el encendido y la combustión, es decir, se debe mantener una relación aire/combustible conocida, por ejemplo teóricamente, para conseguir una completa combinación química es necesario mantener una relación de 14,7 kg de aire por cada kg de GLP a 1 atm y 25 °C (Reed, 1986, p. 178).

Además, los combustibles ya sean sólidos, líquidos o gaseosos, se encuentran compuestos básicamente por carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S), humedad (H₂O), etc. Por lo tanto, las reacciones elementales en toda reacción para que se produzca la combustión están enunciadas desde la Ecuación [1.2] hasta la Ecuación [1.5]:



Entonces, al producirse la reacción se generan como productos gases como el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de carbono (CO₂) entre otros, que dependiendo de la combustión que se logre, se encuentran en mayor o menor proporción y al mismo tiempo, la energía liberada durante la combustión provoca una elevación de temperatura en los productos y la eficiencia alcanzada dependerá de la velocidad de liberación y disipación de energía, así como de la cantidad de productos alcanzados (Mavainsa, 2011, p. 4).

1.2.1 COMBUSTIBLES

Son aquellas sustancias que por su alto contenido energético hacen posible su

combustión al oxidarse en presencia del oxígeno contenido en el aire y al entrar en contacto con una energía de activación, verificándose un desprendimiento de energía y modificando de esta manera su estructura química (Mavainsa, 2011, pp. 4-5,7).

Estas sustancias son de origen orgánico y se las conoce también como combustibles fósiles ya que proceden de la biomasa obtenida hace millones de años y han sufrido grandes procesos de transformación hasta la formación de sustancias como el carbón, el petróleo o el gas natural donde el carbono (C) y el hidrógeno (H) son los elementos predominantes en su composición, de lo cual van a depender las técnicas y equipos a utilizar en su combustión (Mavainsa, 2011, pp. 4-5).

En el país, los hornos, secaderos, calderas y demás actividades industriales utilizan los combustibles en los procesos de combustión de acuerdo a sus necesidades de producción y pueden ser líquidos (que van desde hidrocarburos ligeros hasta corrientes de residuos pesados) y gaseosos (que contienen una mezcla de componentes que pueden ir desde el hidrógeno hasta el butano o pentano).

La mayoría de los combustibles se utilizan en quemadores de tipo combinado, es decir, que pueden trabajar simultáneamente con combustibles gaseosos y líquidos, o alimentados con un sólo tipo de combustible dependiendo de la necesidad del proceso (Serrano, 2004, p. 3).

Poder calórico de los combustibles

Es la cantidad de calor que se obtiene de la oxidación completa a condiciones normales (1 atm y 25 °C) de los componentes de un combustible y en el caso de los combustibles gaseosos se expresa en kcal/kg. En la Tabla 1.1 se pueden observar los valores del poder calórico de algunos combustibles gaseosos que son más utilizados a nivel industrial (Valero, 2004, pp. 27-31).

Tabla 1.1. Poder calórico de algunos combustibles gaseosos a las condiciones de 1 atm de presión y 25 °C de temperatura

Combustible	Poder calórico (kJ/kg)
Gas natural	36 837
Carbono	62 790
Propano	72 732
Metano	55 787
Butano	99776
GLP	50 065

(Hougen, Watson y Ragatz, 1988, pp. 419-427)

El poder calórico depende de la composición en la que se encuentre el carbono y el hidrógeno en la reacción y debido a la oxidación de este último durante la combustión, se produce cierto grado de humedad, permitiendo distinguir dos tipos de poder calórico (García y Zapata, 2007, pp. 269-273):

a. Poder calórico inferior (PCI)

Es la cantidad de calor que puede obtenerse en la reacción si dentro de los productos de la combustión el agua se encuentra en forma de vapor. En este caso una parte del calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua, por lo tanto esta parte del calor no se aprovecha (Holman, 1999, p. 421; Munson, et al., 2002, pp. 26-29).

b. Poder calórico superior (PCS)

Es el calor proveniente del agua que forma parte de los productos de la combustión que aparece también en estado líquido permitiendo aprovechar todo el calor de oxidación de los componentes del combustible. Habitualmente el agua se evacua con los humos en fase de vapor, haciendo que el poder calórico más

comúnmente utilizado sea el inferior (Holman, 1999, pp. 421-422; Munson, et al., 2002, p. 29).

Densidad de los combustibles gaseosos

Se puede definir a la densidad como la medida de cuánto material se encuentra comprimido en un espacio determinado, por lo tanto en unidades se la define como la cantidad de masa por unidad de volumen de un elemento (Munson, et al., 2002, pp. 31-33).

Las variaciones de presión y temperatura afectan muy poco a la densidad de los combustibles líquidos, pero en el caso de los combustibles gaseosos, estos van a depender de dichas condiciones de presión y temperatura debido a que sus moléculas se encuentran muy separadas y existe muy poca fuerza de atracción o repulsión entre ellas, por lo que se encuentran en constante movimiento (Munson, et al., 2002, p. 31).

En la práctica, es importante conocer este parámetro para determinar las condiciones a las que se encuentra el combustible en la reacción. En la Tabla 1.2, se pueden apreciar los valores de las densidades de algunos combustibles gaseosos medidos a condiciones normales, es decir 1 atm de presión y 25 °C de temperatura, tomando en cuenta que la densidad relativa del aire bajo estas condiciones es de 1,293 kg/m³.

Tabla 1.2. Densidad de algunos compuestos gaseosos utilizados a nivel industrial

Gases combustibles	Densidad (kg/m ³)
Gas natural	0,802
Butano	2,625
Propano	2,095
Monóxido de Carbono	1,973
Gas licuado de petróleo	2,201

(Perry, Green y Maloney, 2001, pp. 201-225)

1.2.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN

De acuerdo a como se produzcan las reacciones de combustión, estas pueden ser de distintos tipos:

1.2.2.1. Combustión completa

Ocurre cuando todos los elementos contenidos en el combustible se oxidan totalmente para producir energía. En este caso únicamente se obtendrán los elementos formados debido a la reacción, es decir agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) (Mavainsa, 2011, p. 6).

1.2.2.2. Combustión incompleta

Es la combustión producida cuando parte del combustible no reacciona completamente con el oxígeno debido a que este último no se encuentra en la proporción requerida para la completa combustión, dando lugar a la formación de subproductos o inquemados como carbono (C) u hollín, hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) que en altas concentraciones y con tiempos de exposición reducidos afectan al medio ambiente y pueden llegar a ser letales para el ser humano (Mavainsa, 2011, p. 7).

Entre las causas principales para tener este tipo de combustión podemos mencionar las siguientes:

- Escasa turbulencia dentro del quemador, existiendo por tanto una mala mezcla aire/combustible, debido al poco oxígeno presente en la reacción, generando mayor cantidad de gases de combustión.
- Enfriamiento de la llama producida en ocasiones por la mala mezcla aire/combustible que incide sobre superficies relativamente frías como por

ejemplo el frente de la cámara de combustión (Mavainsa, 2011, p. 8; García, 2001, p. 3).

1.2.2.3. Combustión estequiométrica o teórica

Es la reacción que se lleva a cabo con la cantidad estequiométrica exacta de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de combustión; en este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno entre los productos de la reacción, debido a que este se ha empleado íntegramente en el proceso de combustión y se la conoce como teórica ya que en la práctica es imposible que ocurra (Serrano, 2004, p. 16).

1.2.2.4. Combustión con exceso de aire

Es la reacción que se produce cuando se trabaja con una cantidad de aire superior al requerido de acuerdo a la estequiometría de la reacción, por lo tanto, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los productos o presenta una cantidad mínima de ellos debido a que el exceso de aire empleado permite reaccionar completamente al combustible disponible en el proceso (Serrano, 2004, p. 16).

Por lo tanto, la energía liberada durante la combustión provocará una elevación de la temperatura en los productos y la eficiencia alcanzada dependerá de la velocidad de liberación y disipación de energía, así como de la cantidad de productos (Mavainsa, 2011, p. 11; Serrano, 2004, p. 17).

1.2.2.5. Combustión con defecto de aire

Es la reacción que se produce con menor cantidad de aire que el requerido para la combustión de acuerdo a la reacción estequiométrica y se caracteriza por la

presencia de sustancias combustibles en los gases de la reacción y la disminución de la generación de calor, debido a que no se produce la oxidación total del combustible.

Este tipo de combustión influye en la temperatura de la llama, tiempo de residencia de los reactantes en la cámara y se detecta cuando se forma también monóxido de carbono (CO), que es considerado un gas venenoso aun en cantidades pequeñas si se encuentra en concentraciones superiores al 0,30% en volumen y tiempos largos de exposición.

Además se forma hollín o humo negro, que es una suspensión de pequeñas partículas sólidas formadas por restos de material de combustión generalmente carbón que por acción de su peso se desplazan en el aire de forma visible abandonando el hogar o cámara para depositarse sobre las superficies de calentamiento reduciendo la transferencia de calor e incrementando la pérdida de gases por la chimenea (García, 2001, pp. 27-28).

1.2.3 EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

Es el porcentaje de calor liberado en la llama que es absorbido por el fluido calentado, sus valores van de 70 % al 95 % y permite tener una idea del grado de aprovechamiento del combustible para las condiciones de trabajo dadas.

En términos matemáticos se lo obtiene, como se indica en la Ecuación [1.6] analizando el calor real obtenido del estudio del horno de quema de cerámicos para el calor teórico o ideal que se esperaría que alcance (calor máximo que puede darse en el sistema) sin generar inquemados o gases contaminantes (Holman, 1999, p. 218).

$$\eta = \frac{Q_{real}}{PCS \times m_1} \times 100 \quad [1.6]$$

Donde:

- η : eficiencia de la combustión (%)
 Q_{real} : calor real generado durante el funcionamiento del horno de quema de cerámicos (kJ/h)
 PCS : poder calorífico superior del GLP (kJ/kg)
 m_1 : flujo másico de GLP que ingresa a la combustión (kg/h)

1.2.4 AIRE DE COMBUSTIÓN

Es el aire necesario para que se pueda llevar a cabo la reacción exotérmica de oxidación, por lo tanto, para conseguir una combustión completa, es preciso garantizar que exista suficiente aire suministrado, para lo cual se debe conocer la cantidad de oxígeno que se requiere a través de la estequiometría de las reacciones de combustión del combustible utilizado, en este caso del gas licuado de petróleo (GLP) (Mavainsa, 2011, p. 4).

Una vez analizada la estequiometría de la reacción, se considera también la relación aire/combustible y el caudal real de aire que ingresa a los quemadores para tomar medidas que permitan mejorar el ingreso del combustible a los quemadores y perfeccionar de esta manera la combustión, como por ejemplo precalentando el aire que ingresa a los quemadores, ya sea a través de mecanismos externos o con recirculación del aire que sale del proceso (García, 2001, p. 27; Mavainsa, 2011, p. 4).

1.2.4.1 Relación aire/combustible

Es la relación teórica existente entre el aire que ingresa a los quemadores y el combustible necesario para obtener una combustión estequiométrica o completa y se expresa como se indica en la Ecuación [1.7]:

$$m_{a/c} = \frac{\textit{masa aire}}{\textit{masa combustible}} \quad [1.7]$$

Por lo tanto, para obtener una buena eficiencia en la combustión se espera que esta relación sea lo más cercana posible a la relación estequiométrica, razón por la cual en el presente proyecto, se trabaja a partir de la nivelación de la cantidad de aire y de combustible que ingresa a los quemadores del horno tipo túnel, en función de su relación teórica hasta encontrar una proporción experimental que permita generar gases de combustión en menores concentraciones y a partir de dichas condiciones de operación, se plantea una alternativa que permita mejorar la eficiencia de la combustión y al mismo tiempo conseguir un ahorro de combustible y de energía utilizada en el proceso (Serrano, 2004, p. 37).

En la Tabla 1.3 se aprecian algunas relaciones estequiométricas aire/combustible teóricas, las mismas que se toman como referencia para determinar de forma experimental la relación a partir de la cual se puede trabajar de acuerdo al combustible utilizado (Reed, 1986, pp. 125-126).

Tabla 1.3. Relación estequiométrica de los combustibles más utilizados en procesos industriales

Combustible	Relación estequiométrica aire/combustible
GLP	14,7 : 1
Gas natural	14,5 : 1
Metanol	6,5 : 1
Diesel	14,1 : 1
Etanol	9,0 : 1
Butanol	12,6 : 1
Carbono	11,5 : 1
Propano	15,7 : 1

(Reed, 1986, pp. 125-126)

1.2.4.2 Exceso de aire

Es la cantidad adicional de aire que se debe aportar a la reacción para asegurar una combustión completa y se la obtiene en función de la cantidad de aire

estequiométrico que ingresa al sistema (Serrano, 2004, p. 39). Esta relación existente entre el aire realmente utilizado y el aire mínimo necesario se denomina índice de exceso de aire (λ) y se encuentra representado según la Ecuación [1.8]:

$$\lambda = \frac{\text{flujo másico de aire real}}{\text{flujo másico de aire teórico}} \quad [1.8]$$

Considerando que:

- $\lambda = 1$ combustión estequiométrica
- $\lambda < 1$ defecto de aire, combustión incompleta
- $\lambda > 1$ exceso de aire, combustión completa

1.2.4.3 Curva combustión-exceso de aire

La combustión es un proceso combinado y complejo que debido a las variaciones de temperatura y a los problemas de contacto entre las superficies del sistema, siempre necesita trabajar con un exceso de aire pequeño para lograr una buena combustión como se puede apreciar en la Figura 1.2.

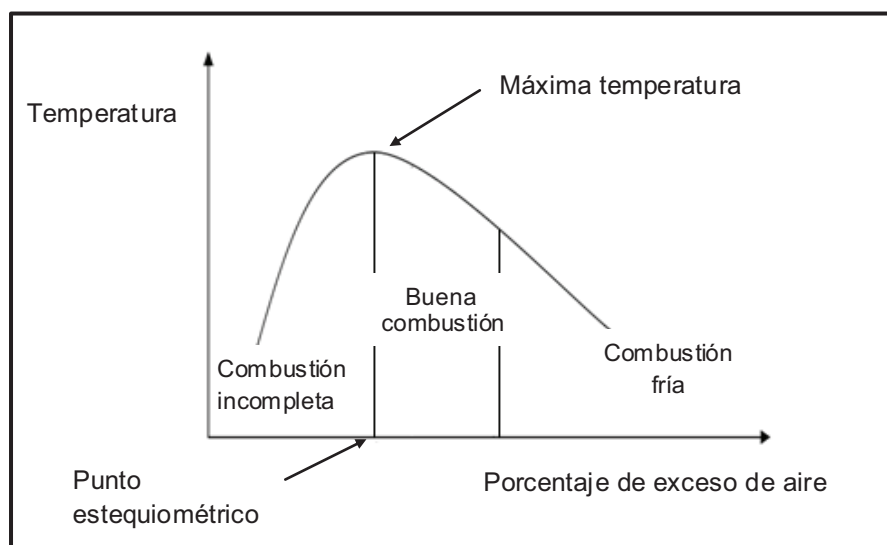


Figura 1.2. Curva combustión - exceso de aire
(Serrano, 2004, p. 46)

Por lo tanto, se debe tomar en cuenta que a medida que el exceso de aire aumenta, se llega a un punto en el cual la temperatura de combustión empieza a disminuir, llegando a obtener lo que se denomina una combustión fría, que resulta ser una combustión poco conveniente pues se consume una alta cantidad de combustible para lograr una buena reacción como se puede apreciar en la Figura 1.2 indicada anteriormente, donde se puede observar también que para la cantidad estequiométrica de oxígeno, corresponde la máxima temperatura ya que se logra una combustión total y no existe exceso de aire que produzca enfriamiento (Serrano, 2004, p. 45).

1.2.5 VENTAJAS DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

A la hora de seleccionar el combustible que mejor se adapte a las necesidades del proceso y que permita mejorar la combustión, se deben considerar aspectos relacionados con la emisión de agentes contaminantes según las normas actuales dispuestas en la Ordenanza 213 que se aplican para todo el Distrito Metropolitano de Quito, las cuales establecen los límites máximos permitidos de emisiones gaseosas y de hecho uno de los factores más importantes en el diseño de quemadores es la baja emisión de contaminantes en función de cantidad de carbono e hidrógeno que forman parte del combustible que se utilice para la reacción de combustión.

Los combustibles gaseosos por lo tanto tienen mayor ventaja sobre los combustibles líquidos o sólidos debido a la cantidad de carbono e hidrógeno que forman parte de sus cadenas y por lo tanto a la mínima presencia de cenizas, materias extrañas y a que se puede tener un mejor control de la combustión, además de que no requieren atomizarse antes de ser parte de la reacción, lo que permite mantener la temperatura de combustión relativamente constante aún con demandas variables de aire y combustible (Munson, et al., 2002, p. 98).

En el caso del gas licuado de petróleo (GLP), este posee un mayor poder calorífico y menor contenido de azufre frente a otros combustibles como son el

búnker y el diesel (combustibles líquidos) como se puede observar en la Tabla 1.4 lo que permite un mejor aprovechamiento del calor generado obtenido de la oxidación y lo hace más competitivo al momento de elegir un combustible en un proceso industrial que requiera mayor generación de energía calórica; además al contener más energía debido a su sencilla estructura molecular es más fácilmente combustible ya que no requiere ningún proceso como la atomización antes de ingresar a la combustión y emite una cantidad de emisiones de contaminantes menor que otros combustibles fósiles (Hougen, et al., 1988, p. 427).

Tabla 1.4. Poder calorífico de los combustibles de mayor demanda a nivel industrial en el Ecuador a las condiciones de 1 atm de presión y 25 °C de temperatura

Combustible	Poder Calorífico (kJ/kg)	Contenido de azufre
Búnker	42 053	0,7 – 0,9 %
Diesel	42 852	0,2 – 0,5 %
GLP	50 065	2 ppm

(Hougen, et al., 1988, pp. 419-427; Petroamazonas, 2008, p. 2)

Sin embargo el búnker y el diesel son más utilizados a nivel industrial debido a sus bajos costos como se puede apreciar en la Figura 1.3.

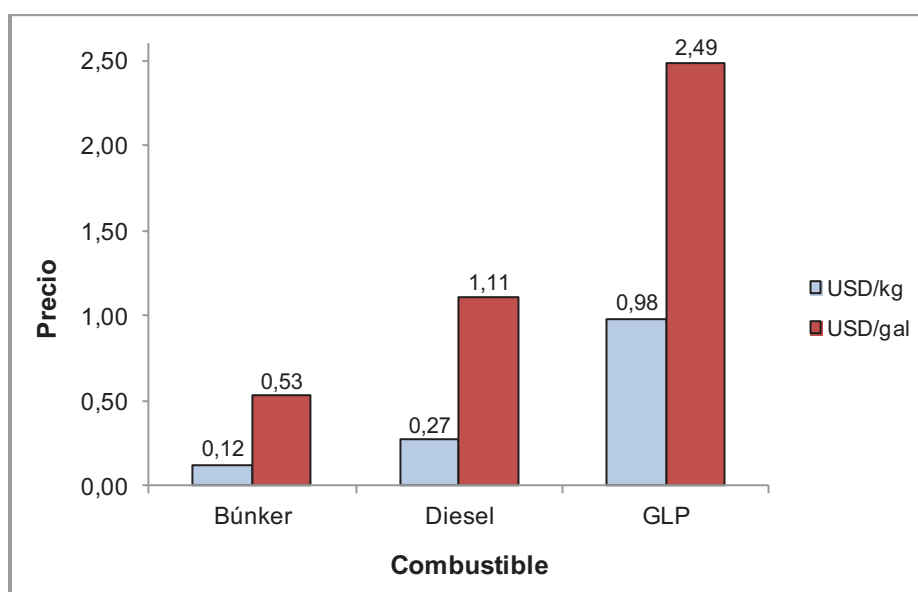


Figura 1.3. Precios de los combustibles más utilizados a nivel industrial en el país (Petroamazonas, 2013, p. 1)

El mayor consumo de búnker y diesel a nivel industrial debido a sus bajos costos se da a pesar de que estos poseen largas cadenas de carbono (diesel 18 cadenas y búnker 20 cadena) frente a las 4 cadenas de carbono del GLP, lo que hace que al momento de reaccionar en la combustión, si esta se da con defecto de aire o con un exceso de aire innecesario, se produzca una mayor cantidad de hollín existiendo por tanto una mayor generación de los gases de combustión (Hougen, et al., 1988, p. 429).

1.2.6 QUEMADORES

Son dispositivos mecánicos diseñados para producir una llama estable, con una forma y tamaño predeterminados que permiten controlar el calor liberado durante la combustión. La gama de combustibles, líquidos y gaseosos, que se queman en este tipo de elementos es tremendamente amplia y su diseño varía dependiendo de la clase de combustible a usar ya que el tratamiento del mismo para conseguir una buena combustión es diferente (Mavainsa, 2011, p. 15; Gómez, 2009, pp. 13-17).

Se puede establecer una distinción entre los quemadores dependiendo del combustible de alimentación, por lo tanto, tenemos quemadores de gas, quemadores de combustibles líquidos y aquellos combinados donde se queman conjuntamente combustibles gaseosos y líquidos. Para los quemadores de gas, sólo se necesita establecer la proporción de los volúmenes de aire, gas y asegurar su íntima mezcla, pero los quemadores de fuel-oil tienen que preparar el combustible, fragmentándolo en pequeñas partículas para dejar expuesta la máxima superficie posible a fin de que el calor del horno lo convierta rápidamente en vapor (Mavainsa, 2011, p. 16).

Las operaciones de mezcla, encendido y combustión se producen en el pequeño intervalo de tiempo que emplean el combustible y el aire en trasladarse desde el quemador hasta la entrada a la zona o cámara de combustión y depende de la distancia recorrida y de la velocidad y grado de turbulencia.

Este grado de turbulencia describe aquella condición en la que el combustible y el aire giran en remolinos siguiendo vías irregulares desde la entrada al quemador hasta ponerse en contacto con la chispa (energía de activación) que permitirá la combustión, lo cual es deseable porque la distancia total que recorre el vapor aumenta al seguir un camino irregular, con lo cual aumenta el tiempo disponible para la reacción, mejora el tipo de combustión e incrementa su eficiencia (Rendón, 2006, pp. 4-5; Mavainsa, 2011, p. 16).

En el caso de los hornos de quema de cerámicos utilizados para la cocción de las piezas cerámicas que trabajan con GLP, este ingresa a la cámara de combustión donde se mezcla con el aire como se puede apreciar en la Figura 1.4; en dicha zona se encuentran los quemadores y debe cumplir las siguientes funciones para lograr obtener una reacción eficiente (Rendón, 2006, p. 5; Mavainsa, 2011, pp. 16-17):

- Permitir el ingreso del combustible y del aire
- Mezclar íntimamente los reactantes
- Conducir efectivamente los reactantes y los gases de combustión
- Distribuir y orientar el flujo de calor.

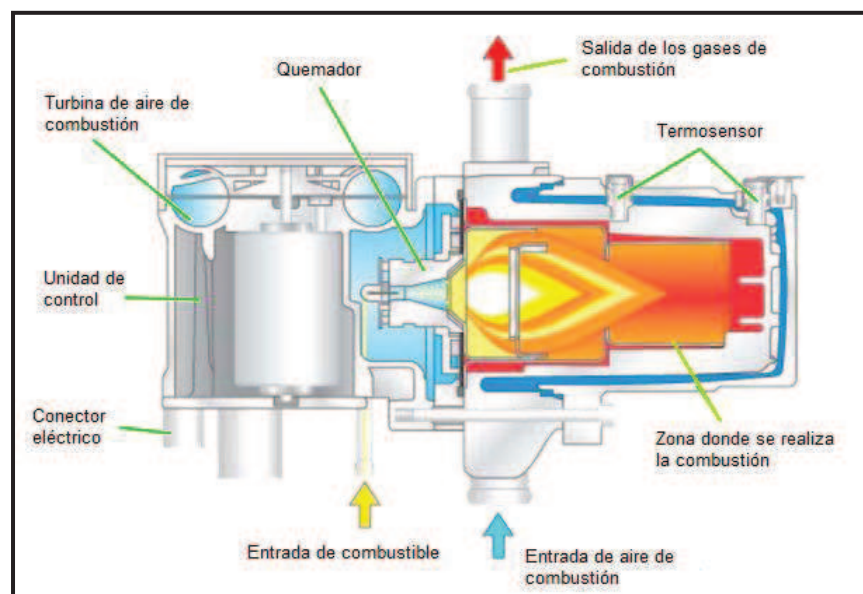


Figura 1.4. Cámara del horno de quema de cerámicos donde se realiza el proceso de combustión

En consecuencia es importante establecer la relación aire/combustible en función de la cantidad de calor necesaria para el proceso de combustión, la cantidad de aire teórico y la cantidad de aire obtenido experimentalmente y conocer los tipos de quemadores más utilizados en función del tiro, que no es más que la variación de presión que induce o empuja al aire y combustibles a través del hogar, pudiendo distinguir dos tipos de tiros (Mavainsa, 2011, p. 21):

- de tiro natural, y
- de tiro forzado.

1.2.6.1 Quemadores de tiro natural

Este tipo de quemadores invierten la presión de tiro disponible en inducir velocidad a la corriente de aire que circula a través de ellos, es decir, aspiran aire del medio controlado por rejillas u obturadores ajustables como se puede observar en la Figura 1.5; esta presión es mínima provocando que la velocidad adquirida por el aire que ingresa sea reducido, disminuyendo el poder de mezcla al unirse la corriente de aire con el combustible (García, 2001, pp. 42-45; Mavainsa, 2011, p. 23).

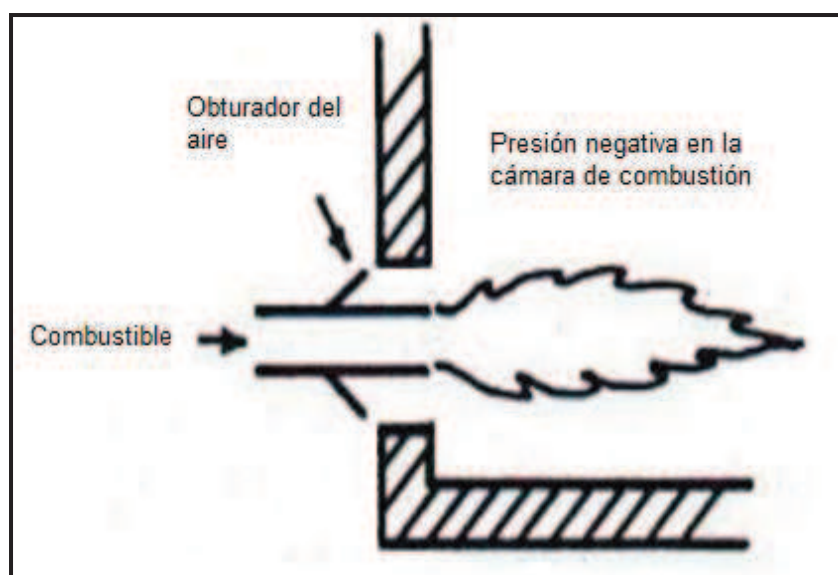


Figura 1.5. Esquema de un quemador de tiro natural

Esto se traduce en un mayor tiempo de combustión por lo que la llama será larga y por lo tanto, necesitará un mayor exceso de aire para tener una combustión completa.

La ventaja en este tipo de quemadores es su reducido costo inicial así como la ausencia de ventiladores que impulsen el aire de combustión. Sin embargo, es difícil el control aire/combustible debido a que no es posible regular la entrada de los flujos de aire y combustible al quemador y su uso es generalmente doméstico (García, 2001, p. 45).

1.2.6.2 Quemadores de tiro forzado

Se los conoce como quemadores de tiro forzado porque el aire y el combustible se suministran con presión positiva para que fluyan a través del hogar y utilizan un ventilador de inyección para lograr una buena mezcla de ambos flujos por la caída de presión y control de configuración de llama como se puede apreciar en la Figura [1.6].

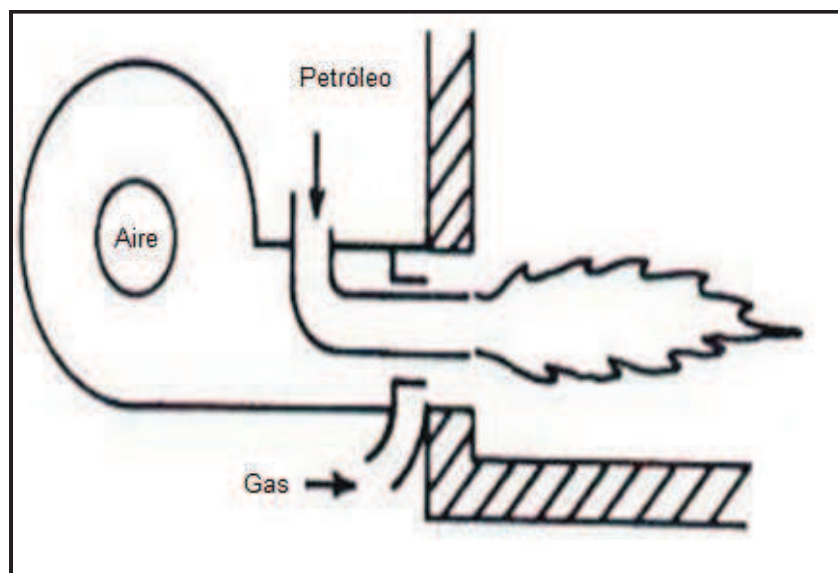


Figura 1.6. Esquema de un quemador de tiro forzado

Este tipo de quemadores son los más utilizados a nivel industrial como en el caso

de los hornos de quema de cerámicos donde se realizó el proyecto de titulación debido a que es más fácil controlar las condiciones a las que se produce la combustión, mientras que los quemadores de tiro natural se encuentran afectados por la temperatura y el viento generalmente.

1.2.6.3 Criterios de operación para el quemador

La utilización eficiente de los quemadores y equipos de combustión en procesos y en hornos industriales de quema de cerámicos debe ir enfocado en el mejor aprovechamiento de los recursos teniendo en cuenta además:

- Obtener la máxima eficiencia de la combustión.
- Operar con consumos constantes de combustible y aire.
- Calentar las cargas a la temperatura adecuada y en el tiempo necesario para mejorar las condiciones de cocción de las piezas.
- Disminuir el impacto ambiental que pueda ocasionar una mala combustión o una combustión incompleta (García, 2001, p. 46; Mavainsa, 2011, pp. 23-24; Gómez, 2009, p. 57).

Por esas razones para controlar la combustión es importante utilizar quemadores que se ajusten a las necesidades de uso de calor, las exigencias del mercado del producto y al costo del combustible. Después de seleccionar el quemador que armoniza con estas variables, se deben instalar los accesorios que permitan el ajuste de la mezcla aire/combustible, como por ejemplo manómetros, válvulas de globo, reguladores, sistemas de levas, controladores electrónicos, etc. (Mavainsa, 2011, p. 41).

1.2.7 CALOR DISPONIBLE Y EFICIENCIA DEL PROCESO

Los productos generados por la combustión poseen una energía térmica o calor disponible (Q_{dis}) de acuerdo a su temperatura, la cual se entiende como la

cantidad de energía que puede ser convertida en energía útil tal como se indica en la Ecuación [1.9]:

$$Q_{dis} = PCS - Q_{gases \text{ en la chimenea}} \quad [1.9]$$

Donde:

PCS : poder calórico superior del combustible (kJ/kg)

Q_{gases} : energía contenida en los gases de combustión en la chimenea (kJ/kg)

En la Figura 1.7 se observa la relación entre el exceso de aire en el quemador y la temperatura de los gases de combustión sobre el calor disponible del proceso de calentamiento, este último como porcentaje del poder calórico superior que sería la máxima energía útil. Se puede notar también que para un exceso de aire fijo el calor disminuye a medida que la temperatura de los gases aumenta, lo que indica que no se le está extrayendo toda la energía útil del proceso de combustión y por lo tanto, se está quedando un remanente importante y susceptible que también se puede aprovechar (Serrano, 2004, pp. 53-55).

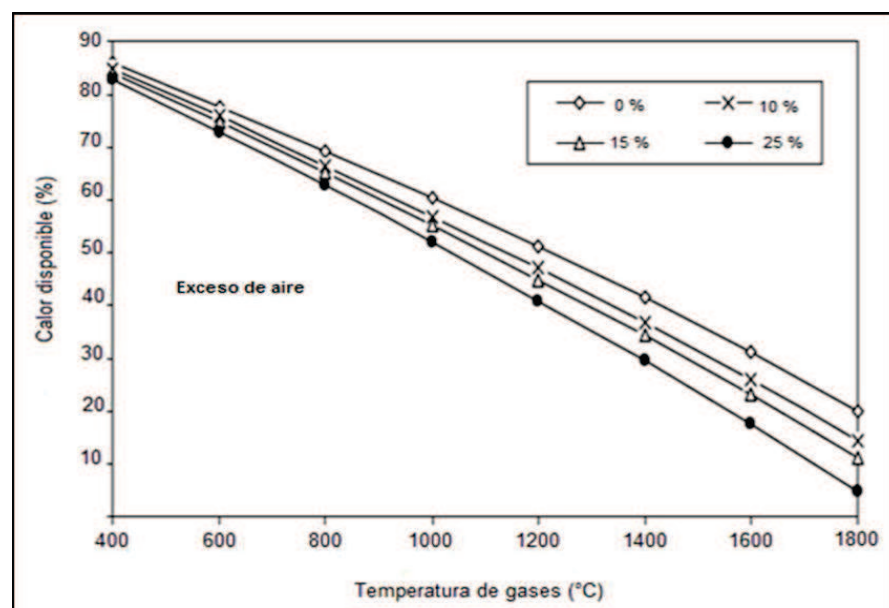


Figura 1.7. Porcentaje de calor disponible respecto al poder calórico superior como función de la temperatura de los gases de combustión y el exceso de aire (Serrano, 2004, p. 53)

Si se considera constante la temperatura de los productos, se nota la influencia negativa del exceso de aire, puesto que el calor disponible disminuye debido a que el aire que adicionalmente ingresa a la combustión forma parte de la energía química transformada. Una observación importante para disminuir la temperatura de los productos e incrementar calor disponible es la instalación de recuperadores de calor que constituyen alternativas con buena viabilidad técnico-económica (Serrano, 2004, p. 57).

1.2.8 CONTROL DE LA MEZCLA EN EL QUEMADOR

Para poder analizar el calor liberado en la combustión es necesario actuar directamente sobre los elementos que participan en la reacción, siendo uno de estos el quemador, que puede producir una llama estable con una forma y tamaño predeterminados pero que requiere del ingreso del aire y el combustible en las cantidades adecuadas.

Los quemadores de gas utilizados en los hornos de quema de cerámicos establecen la proporción de los volúmenes de aire y gas y aseguran su buena mezcla, lo cual es una gran ventaja sobre los quemadores de combustibles líquidos (Serrano, 2004, p. 113).

Es importante conocer también que la eficiencia de los quemadores se encuentra asociada a la energía química que puede ser transformada en el calentamiento de los productos de combustión, y es total si toda la energía química almacenada en el combustible es convertida en calor disponible para el proceso (Gómez, 2009, p. 193).

Lo anterior quiere decir entonces que una alta temperatura de los productos de combustión directamente a la salida del horno, constituye un indicativo del menor impacto de las pérdidas caloríficas debido a la formación de agua en forma de vapor, a la disociación de especies a través de reacciones que son endotérmicas y a las pérdidas de calor en la llama (Borman, 1998, pp. 417-422).

La Figura 1.8 permite determinar la eficiencia de la combustión de acuerdo a la temperatura que poseen los gases inmediatamente a la salida del quemador. Se puede observar además cómo para un determinado porcentaje de exceso de aire definido en la reacción, la eficiencia se incrementa a medida que la temperatura de los gases se eleva, por lo tanto, el exceso de aire empleado en el proceso es un factor importante para la determinación de la eficiencia de la combustión y la temperatura de salida de los gases de combustión, es decir, afecta directamente a la concentración de los gases contaminantes emitidos a la atmósfera (Serrano, 2004, p. 114).

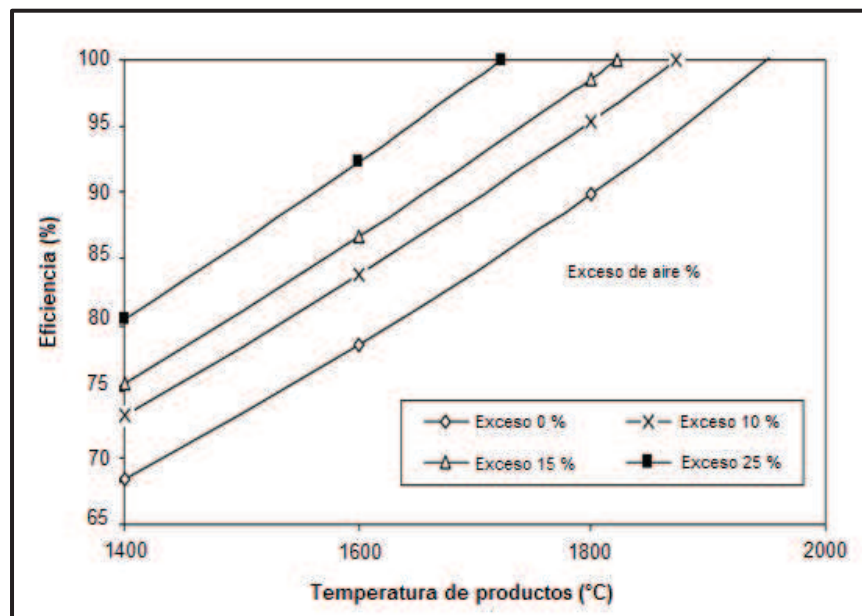


Figura 1.8. Eficiencia de combustión vs temperatura de productos y exceso de aire (Serrano, 2004, p. 113)

Cuando se comparan a una misma temperatura de productos las combustiones para diferentes excesos de aire, se dice que es una combustión sin exceso de aire si sus productos se encuentran a la misma temperatura de una combustión con exceso de oxígeno, bajo la misma adición calórica por unidad de combustible y por lo tanto se considera que el quemador sería más eficiente (Gómez, 2009, p. 194; Serrano, 2004, pp. 114-115,117).

Esto se produce porque el exceso de aire en la reacción es una carga térmica que también necesita ser calentada hasta el nivel de temperatura analizado,

provocando una mejor utilización de la energía del portador energético. Se espera entonces que para quemadores de similar eficiencia y operando con el mismo combustible, la temperatura de los productos sea mayor que en el quemador que emplee el menor exceso de aire como se puede observar claramente en la Figura 1.8 (Serrano, 2004, p. 114).

Es importante conocer también cómo las combustiones con elevados excesos de aire no desarrollan niveles de temperatura tan altos como las combustiones estequiométricas debido a la cantidad de oxígeno que se mezcla íntegramente con el combustible durante la reacción. En el caso de los quemadores industriales, estos suelen operarse con un exceso de aire del 15% con el fin de minimizar riesgos ante posibles gases contaminantes y malas combustiones (García, 2001, p. 15).

Por lo tanto, utilizar mayores excesos de aire sería desfavorable energéticamente y emplear excesos muy bajos conllevaría a tener mezclas poco íntimas de aire y combustible con la consecuente generación de inquemados (ya sean sólidos o gaseosos) y de riesgos asociados a los mismos, como por ejemplo la pérdida de potencia calorífica en el combustible o la formación de hollín, el cual por su densidad tiende a depositarse sobre las superficies de las tuberías, dificultando la transferencia de calor y provocando un aumento en las pérdidas de calor por aumento de la temperatura de los gases de combustión (Faires, Simmang y Brewer, 1993, p. 649).

1.2.9 GAS LICUADO DE PETRÓLEO

Es una mezcla de hidrocarburos livianos obtenida del procesamiento de refinación del petróleo que contiene generalmente propano, butano, iso-butano y en menor proporción propileno y butileno, siendo los productos más comerciales el propano, butano o la mezcla de ambos. En la Tabla 1.5 se puede observar la composición del gas licuado de petróleo (GLP) que se maneja actualmente en el país (Petroamazonas, 2013, p. 17):

Tabla 1.5. Composición del GLP en el Ecuador

Componentes	Volumen (%)
Etano	1,94
Propano	59,28
i-butano	11,85
n-butano	26,60
i-pentano	0,30
n-pentano	0,03

(Petroamazonas, 2008, pp. 17-19)

Además sus dos componentes principales, propano (59,28%) y butano (26,60%) tienen características físicas diferentes entre ellos como se puede apreciar en la Tabla 1.6, en la cual se han considerado ciertas propiedades relevantes de los mismos y que son las más influyentes dentro de su composición.

Tabla 1.6. 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

(Perry, et al., 2001, pp. 276, 285, 302)

Por otra parte el GLP es un hidrocarburo que a temperatura ambiente y presión atmosférica se encuentra siempre en estado gaseoso y tiene la propiedad de pasar al estado líquido al ser sometido a una presión relativamente superior a la atmosférica, propiedad que le confiere la gran ventaja de poder ser almacenado en estado líquido, ocupando un volumen muy reducido (Unger, 2008, p. 2).

Debido a esto, dicha mezcla de gases se envasa en tanques o bombonas que se llenan entre un 80% a un 85% de su capacidad como se puede observar en la

Figura 1.9 dejando un espacio libre para absorber la expansión que se produce al subir la temperatura exterior.

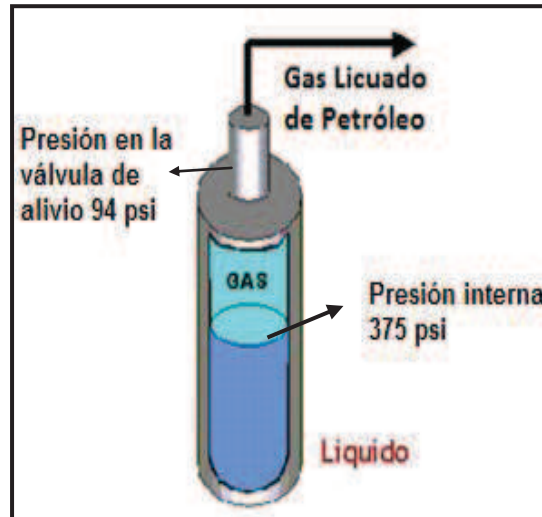


Figura 1.9. Representación gráfica del almacenamiento del GLP

Es importante también conocer que al existir menor cantidad de átomos de carbono por molécula, el GLP emite “estequiométricamente” menor cantidad de CO_2 a la atmósfera en relación con otros combustibles como la gasolina, kerosene, diesel, leña o carbón que poseen cadenas carbónicas mucho más grandes y por lo tanto, producen mayor cantidad de gases contaminantes cuando reaccionan (Petroamazonas, 2008, p. 19).

Por ejemplo, en la Ecuación [1.10], la reacción estequiométrica del GLP en el proceso de combustión permite obtener como producto 14 moles de CO_2 , mientras que de la combustión del diesel que es la Ecuación [1.11] se obtienen 48 moles de CO_2 .



Esto nos permite concluir que teóricamente es mejor trabajar con un combustible gaseoso, en este caso el GLP, ya que produce menor cantidad de gases contaminantes, sin embargo debido a los costos del GLP en el área industrial, en

ocasiones se prefiere trabajar con combustibles líquidos como el búnker.

1.2.9.1 Propiedades del GLP

Entre las principales propiedades del GLP que son consideradas a nivel industrial podemos mencionar las siguientes:

Toxicidad

El gas licuado de petróleo no es tóxico, pero su acción fisiológica sobre el organismo producida por una posible inhalación, se traduce en una ligera acción anestésica; es decir, puede producir asfixia cuando la persona se encuentra expuesta en un lugar cerrado que contenga una atmósfera saturada del gas, en la cual prácticamente no exista oxígeno por un lapso de tiempo determinado (Petroamazonas, 2008, p. 13).

Densidad y viscosidad

La densidad y la viscosidad del GLP varían según su composición y debido a que sus propiedades (densidad y viscosidad) son mayores que el aire ($2,201 \text{ kg/m}^3$ y $1,85 \times 10^{-5} \mu$ para el GLP y $1,293 \text{ kg/m}^3$ y $1,71 \times 10^{-5} \mu$ para el aire respectivamente), este combustible es más pesado; es por esta razón que una nube de GLP tenderá a permanecer siempre a nivel del suelo (Petroamazonas, 2008, p. 13).

Contenido de azufre

El gas licuado de petróleo es un combustible inodoro en estado puro, por eso es necesario añadir siempre compuestos de azufre para su comercialización debido

a que tienen un olor desagradable y sirven para advertir un escape en las tuberías o en los aparatos de gas. Uno de los compuestos más comunes para odorizar el GLP es el etil-mercaptano, cuya fórmula química es C_2H_6S y se utiliza en concentraciones pequeñas, máximo 10 ppm (partes por millón) de tal manera que una fuga pueda ser detectada por el olfato humano sin sufrir trastornos en la salud (Petroamazonas, 2008, p. 15).

1.2.9.2 Producción del GLP a nivel mundial

Los incrementos en los precios del petróleo dan lugar a repercusiones en todos los aspectos de la economía mundial; mientras tanto, la menor cantidad de emisiones producidas por la utilización de gas licuado de petróleo, uno de los derivados más utilizados del petróleo lo hacen cada día más popular.

Es por esta razón que la producción mundial de GLP viene dada principalmente por el consumo a nivel doméstico e industrial, siendo en la actualidad Estados Unidos el mayor productor del mundo, seguido por Arabia Saudita, Canadá, como se observa en la Figura 1.10.

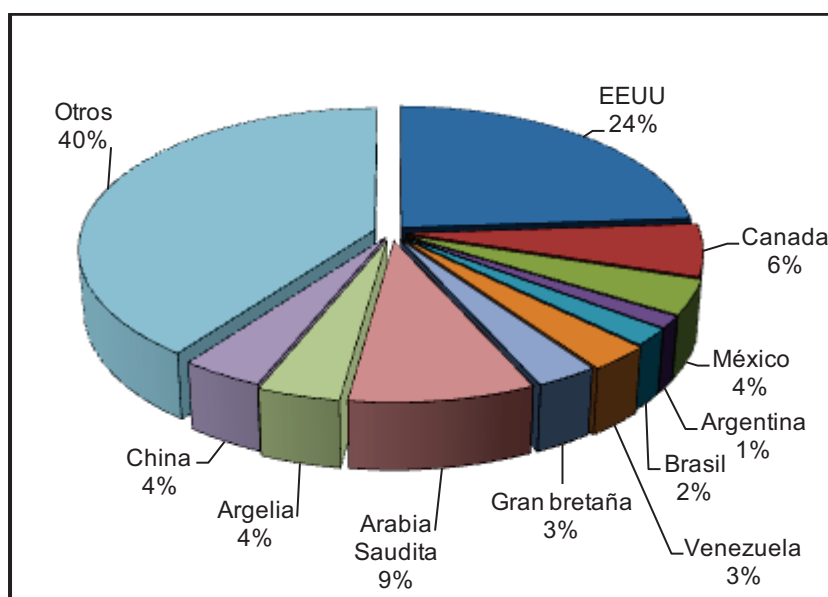


Figura 1.10. Producción mundial del GLP
(World LPG Association, 2012)

El consumo del GLP en el mundo ha crecido a lo largo de los últimos años siendo los países con mayor crecimiento industrial y demográfico quienes tienen un mayor consumo, entre los que se encuentra Estados Unidos, Japón, China y otros países menos industrializados como se puede observar en la Figura 1.11:

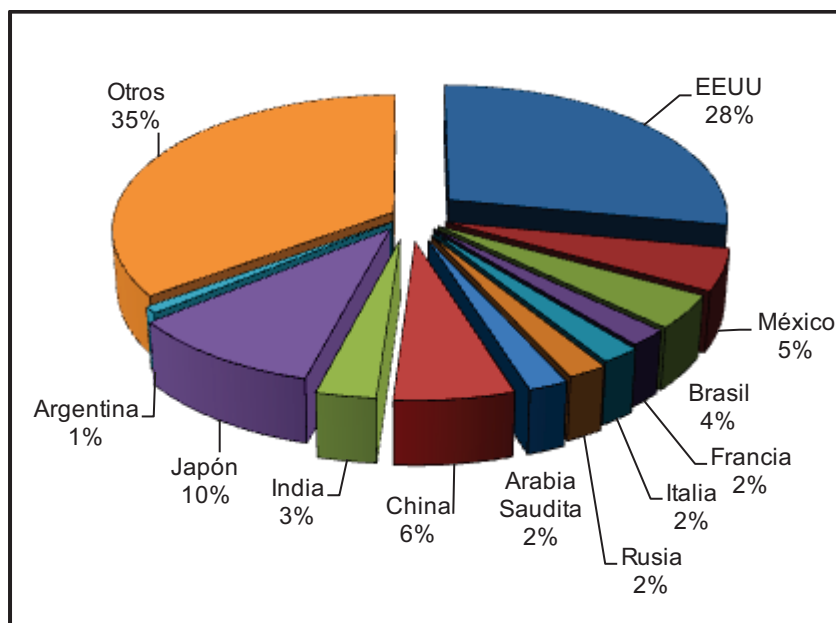


Figura 1.11. Consumo Mundial de GLP
(World LPG Association,2012)

1.2.9.3 Consumo de GLP en el Ecuador

Los consumos domésticos, industriales y comerciales son el principal destino del GLP que representan el 89% del total de su utilización y de acuerdo a las estadísticas de comercio exterior del Banco Central del Ecuador, nuestro país se encuentra dentro de los países con más uso del GLP a nivel industrial.

En el Ecuador, los costos de importación del GLP se han incrementado en los últimos años debido a que el país es uno de los países de América del Sur que más subsidia a los, generando pérdidas económicas que se producen además por su contrabando y mal uso.

El consumo del GLP en el Ecuador se compone además de unos 1 376 000 m³ de

demanda anual nacional aproximadamente, con una producción en sus refinerías de 336 000 m³ y una importación de dicho producto que se encuentra por sobre los 1 040 000 m³ para uso doméstico, industrial y comercial. Además, en el país se comercializan cilindros de 15 kg para uso doméstico y de 45 kg para uso comercial, de los cuales los primeros se encuentran subvencionados por el Estado en casi un 65 % del precio real (Petroamazonas, 2013, pp. 1-2).

Por otro lado, el precio actual de un kilogramo de GLP es de 0,30 dólares de los cuales para el sector doméstico el gobierno asume el 63 % del costo debido a que mantiene un subsidio que no se aplica para el sector comercial ni industrial debido a que considera que las personas naturales o jurídicas que deseen aprovisionarse de GLP en grandes cantidades pueden estar en capacidad de asumir un precio más alto; en el caso del sector industrial, por ejemplo el costo del kg varía siempre dependiendo de la oferta y la demanda, por lo tanto, actualmente el GLP para estos sectores tiene un costo de 0,98 USD/kg (Petroamazonas, 2013, p. 4; World LPG Association, 2012, p. 3).

1.3 HORNOS CERÁMICOS TIPO TÚNEL

Un horno es un dispositivo que genera calor, lo mantiene dentro de un compartimento cerrado y la energía calórica que es utilizada para alimentarlo puede obtenerse directamente por combustión (leña, gas u otro combustible), radiación (luz solar) o indirectamente por medio de la electricidad (horno eléctrico) (Gómez, 2009, p. 193).

En el caso del horno tipo túnel donde se realizó el proyecto de titulación, este es continuo y de bajo nivel de emisiones recomendado para la quema de materiales de mayor peso y volumen (ladrillos, inodoros, vajilla), en donde el material se moviliza mediante vagones que se desplazan a través de una galería con la finalidad de que se mantengan fijas las zonas de fuego y hacer pasar las piezas cerámicas siguiendo la curva de calentamiento que corresponde a un programa de cocción previamente establecido.

Tomando en cuenta que la temperatura encontrada por los materiales conforme avanzan a lo largo del túnel aumenta al principio y disminuye después gradualmente, se observa que la estructura del horno en un punto dado se mantiene siempre a la misma temperatura; de esta manera se consigue que la energía calorífica se consuma solamente en las transformaciones químicas irreversibles de las piezas cerámicas (Edesa, 2010, p. 3).

1.3.1 ESTRUCTURA DE LOS HORNOS TIPO TÚNEL

Dentro de estos hornos existe un largo canal por el que se empujan varios trenes de carros sobre rieles como se puede observar en la Figura 1.12 y donde la armazón inferior se encuentra protegida por gruesos revestimiento de un material aislante y refractario (Gómez, 2009, p. 194).

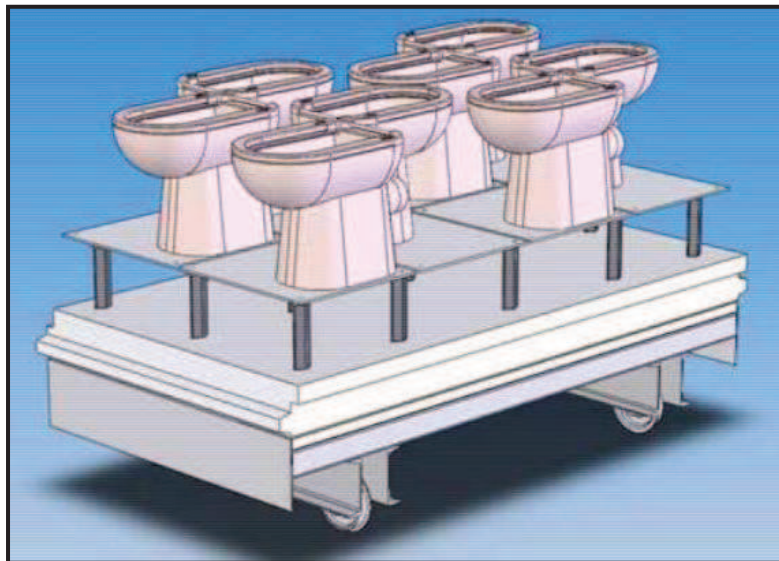


Figura 1.12. Tren de carro sobre ruedas que transporta a las piezas cerámicas a lo largo del horno tipo túnel

Para proteger enteramente las ruedas del calor del horno se puede dar acceso a aire frío debajo de las vagonetas a lo largo de los rieles y de las ruedas, de esta manera ingresan las piezas cerámicas para su cocción, considerando siempre que las vagonetas se encuentran ajustadas unas a otras sin espacios libres y se empujan en el túnel a través de rieles programadas para desplazarse a lo largo

del horno túnel suministrando la presión necesaria para esta acción, la cual es de alrededor de 100 psi en un lapso de aproximadamente 13 horas obteniendo así piezas cerámicas en óptimas condiciones de venta (Edesa, 2010, p. 4).

1.3.1.1 Operación de los hornos

El objetivo del horno es la cocción de las piezas cerámicas, proceso que consiste en someterlas a un ciclo térmico durante el cual tienen lugar una serie de reacciones que provocan cambios en su micro-estructura y les confieren las propiedades finales deseadas, siendo el parámetro más importante a controlar la temperatura, debido a que en el proceso de vitrificación es el factor del que dependerá el llegar a conseguir un producto resistente y homogéneo en su coloración. Por lo tanto, el producto a quemarse es previamente revisado como se indica en la Figura 1.13 con la finalidad de garantizar que las piezas se encuentren limpias al momento de cargarlas dentro de las vagonetas para que puedan ingresar a la cocción.



Figura 1.13. Revisión de las piezas antes de ingresar al horno cerámico

A continuación las piezas ingresan al horno para iniciar los procesos de cocción

que se encuentran claramente definidos en tres zonas indicadas en la Figura 1.14 de la siguiente forma:

1. Zona de **ingreso y pre-calentamiento** cuya función es ayudar a uniformizar la temperatura a la entrada del túnel, donde se permite el ingreso de aire (aire de atomización), el cual circula y asiste en la estabilización de la temperatura (Edesa, 2010, p. 6).
2. Zona de **quema o cocción**, la cual cuenta con una mayor cantidad de quemadores donde la temperatura alcanza los 1200 °C. justamente para cocer totalmente a las piezas.
3. Zona de **enfriamiento** dentro del mismo horno, la cual se divide en dos zonas: la primera que es la zona de enfriamiento rápido y la segunda que es la zona de enfriamiento lento y su función es la de estabilizar la temperatura de las piezas antes de salir del horno de forma gradual (Edesa, 2010, p. 7; Gómez, 2009, p. 199).

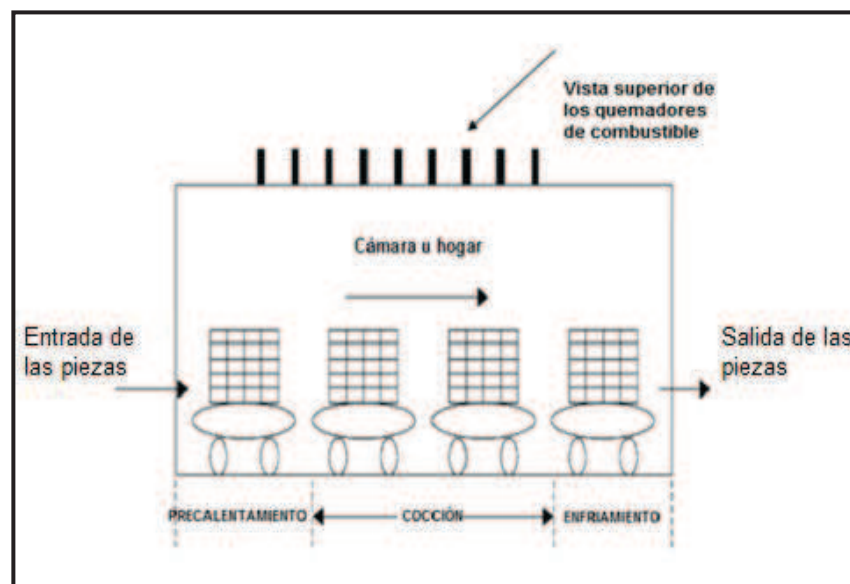


Figura 1.14. Esquema de un horno tipo túnel

El horno tipo Túnel Bricesco Modular que es el objeto de estudio y cuyo esquema se encuentra en el Anexo I del presente proyecto de titulación, posee un equipo y

sistemas de transferencia automáticos a la entrada y salida del horno que permiten a las piezas circular a una velocidad controlada y pre-establecida para su eficiente cocción.

Dicho sistema posee además bandas transportadoras para conducir los coches hacia el interior del horno y una pista/transportador de rodillos que funciona de manera automática para ingresar las piezas y posteriormente descargarlas para su clasificación y envío al área de inspección final y embalaje antes de salir finalmente al mercado (Edesa, 2010, p. 19).

1.3.1.2 Visualización de la llama

Para que la reacción de combustión se realice correctamente, se debe monitorear regularmente el buen funcionamiento del horno, para lo cual se realiza constantemente una inspección visual el estado de la llama como se observa en la Figura 1.15, para nivelar el flujo del combustible de ser necesario (Gómez, 2009, p. 201).

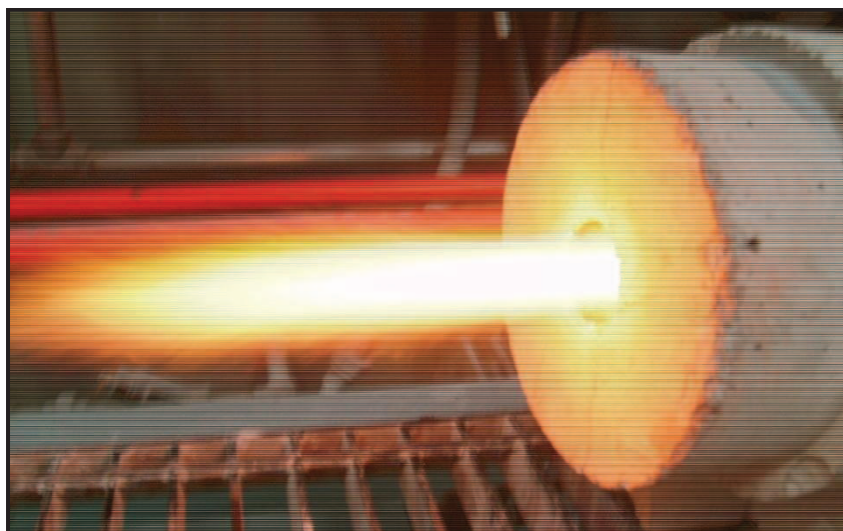


Figura 1.15. Llama proveniente del quemador encendido

Dicha inspección visual permite conocer como primer indicador si se producen variaciones de color en la llama al variar el aire que ingresa a la combustión; estos

cambios pueden apreciarse a simple vista en el quemador mientras se produce la reacción de combustión y se los interpreta de acuerdo a la Figura 1.16 descrita a continuación:

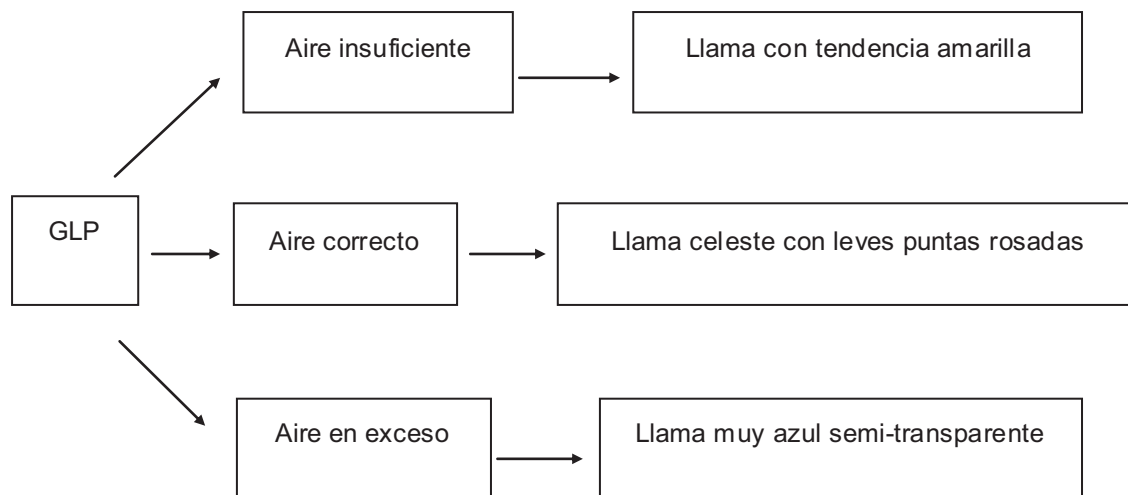


Figura 1.16. Interpretación del estado de la combustión a través de la visualización de la llama

Esto nos permite determinar de una forma preliminar la calidad de combustión que se está produciendo dentro de la cámara por la cantidad de aire que ingresa en exceso al hogar para poder tomar medidas para prevenir emisiones altas de contaminantes (Serrano, 2004, p. 47; Molina, 1984, pp. 67-68; García, 2001, pp. 29-31).

También es necesario conocer que las variaciones de color en los gases de combustión que salen por la chimenea ayudan a conocer el tipo de combustión que se está produciendo en el hogar y que puede darse por razones engañosas a la vista (por ejemplo el mezclado incorrecto aire/combustible)(Serrano, 2004, pp. 39-45; García, 2001, p. 28).

Por lo tanto, la visualización interpretada en la Figura 1.17 sirve como indicativo y como evaluación rápida del tipo de reacción que se está produciendo en la cámara de combustión pero no debe tomarse como parámetro de buen funcionamiento sin realizar un análisis de los gases de combustión de forma periódica.

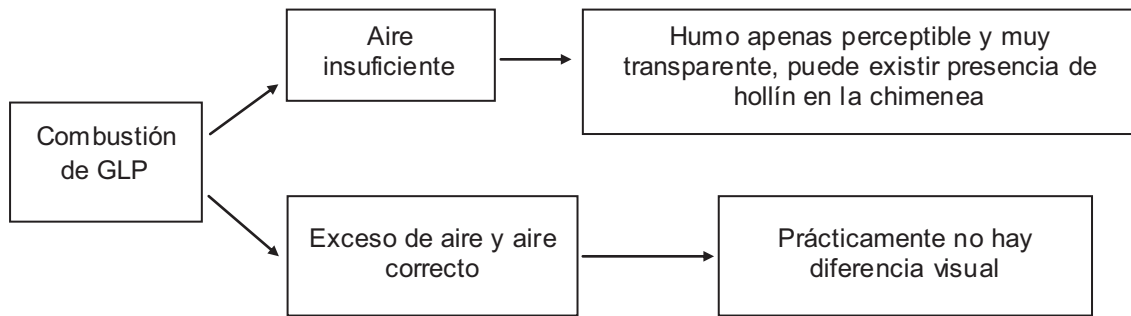


Figura 1.17. Interpretación del tipo de combustión en función de los gases de combustión

1.3.1.3 Mantenimiento de los quemadores

Para disminuir o amortiguar la generación de gases contaminantes, la empresa donde se realizó este proyecto de titulación ha desarrollado actividades planificadas de mantenimiento para proceder a limpiar y cambiar los filtros y limpiar los quemadores, tomando en cuenta los siguientes aspectos operacionales:

- a) Bajas temperatura de trabajo
- b) Dimensión de la llama u oscilación (para hornos continuos)

Otros parámetros influyentes en el proceso de combustión que se toman en cuenta para el mantenimiento de los quemadores son: su eficiencia, las emisiones contaminantes en función del exceso de aire (relación aire/combustible), la presión interna y la temperatura en sus diferentes zonas para así garantizar que todas las piezas sean correctamente precalentadas, cocidas y finalmente enfriadas.

Estos estudios se realizan debido a que si no se mantiene un correcto control de estos parámetros, el producto cerámico podría tener fisuras debidas a la mala cocción y consecuencias como una mala combustión, que no solo influiría en la calidad del producto final, sino que también podría contribuir a un mayor consumo de energía y consecuentemente mayor generación de gases contaminantes (Edesa, 2010, pp. 24-25).

1.4 AHORRO ENERGÉTICO

El uso de GLP como combustible más limpio y con precios competitivos ha venido aumentando en los sectores industrial, comercial, doméstico y vehicular en los últimos años debido al gran desafío actual por disminuir el uso de combustibles fósiles; además, el conocimiento sobre su proceso de combustión y de los quemadores de gas constituye una herramienta fundamental para el perfeccionamiento de la explotación y uso de este combustible bajos criterios ambientales, técnicos, legales y económicos (Serrano, 2004, pp. 132-133).

Otro de los factores que incide en un ahorro de energía durante los procesos industriales de cocción es la utilización de hornos tipo túnel que reemplaza los hornos tipo Hoffmann debido al mejor aprovechamiento de calor generado por el combustible (Campos, Méridoy Navarro, 2013, pp. 19-21).

Este impacto además es una oportunidad que obliga a reducir los desperdicios en el uso de energía, ajustando nuestro consumo a estrategias de uso eficiente como por ejemplo las mencionadas a continuación:

a) Incremento de la eficiencia de la energía.- significa aumentar la eficiencia térmica de la combustión aprovechando al máximo las propiedades del combustible durante la reacción tales como: temperatura, velocidad de flujo, concentración del oxígeno, cantidad de carbonos presentes en la reacción.

Esto también interfiere en la selección de equipos más eficientes para la utilización de la energía total del combustible que permitan mejorar la mezcla aire-combustible y aprovechar de mejor manera el tiro propio de la combustión (Serrano, 2004, p. 31).

b) Disminución de pérdidas en el uso de la energía.- esto se logra incrementando el aislamiento de reactores, ductos, hogares, etc., para aumentar la transferencia de calor precalentado y evitar que esta energía se transfiera al medio.

c) Mejoramiento del consumo de energía.- considerando la disponibilidad y costo del combustible en comparación con otras fuentes de energía pueden cambiarse procesos, eliminando el uso de la fuente de energía más costosa, por ejemplo: diesel por gas licuado de petróleo.

Se puede observar entonces que existen algunas posibilidades de ahorro de energía en los procesos productivos pero siempre dependerán de la variedad de la cesta de productos energéticos disponibles: tecnología, capacitación, regulaciones ambientales, etc.

No obstante antes de evaluar la inversión económica en una mejora de ahorro energético dentro de una industria, debemos estar seguros que hemos llegado al máximo en la utilización del combustible porque conocemos y controlamos todos los elementos que intervienen en la combustión como son las propiedades y mejores usos de los elementos que participan en la combustión (Rendón, 2006, pp. 7-9).

Por lo tanto, las siguientes son las principales mediciones recomendadas para un análisis de combustión de hidrocarburos en un horno que opera con gas licuado de petróleo:

- Temperatura del combustible
- Concentración de O₂
- Temperatura de gases
- Análisis visual de la llama

Mediante tales mediciones se puede establecer si se está manteniendo una adecuada combustión y por ende los ajustes necesarios al proceso para obtener mejoras en su eficiencia. Si el combustible y el aire no se mezclan homogéneamente, se pueden generar CO e H₂ a altas temperaturas durante la combustión incompleta; es posible bajo estas condiciones también producir hollín y/o humo negro. Además, el incremento en la eficacia de la conversión energética tiene un gran impacto en las emisiones de CO₂, por esta razón una mejora de la

eficiencia del 30,0% al 40,0% supone una reducción del 25,0% de CO₂ por unidad de energía producida. Entonces, para controlar la combustión primero debemos estar seguros de que utilizamos el quemador que mejor se ajusta a las necesidades de uso del calor, las exigencias del mercado de nuestro producto y el costo del combustible.

Posteriormente debemos medir continuamente el consumo de combustible para alertar sobre cualquier desvío que pueda presentarse por algún desajuste de la calibración, para lo cual utilizamos un manómetro de presión (Rendón, 2006, p. 57).

En conclusión, cada proceso que necesite calor requerirá de un rendimiento de la combustión particular y para obtener el máximo beneficio de energía del combustible, debemos controlar la mezcla de éste con el aire; sólo así podemos saber si estamos utilizando el combustible eficientemente y continuar con otras mejoras que reduzcan aún más el gasto.

Dicho control se puede abordar por dos caminos a seguir, como son: los parámetros de operación y las características de diseño del equipo, parámetros que son analizados siempre que se requiera realizar estudios sobre la eficiencia energética a nivel industrial (Dirección Nacional de Electricidad, 2008, pp. 8, 18-20, 21).

1.4.1 PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN UN HORNO QUE OPERA CON GLP

Si se quiere optimizar la combustión de un horno que opera con gas licuado de petróleo, los factores operacionales a trabajar son (Rendón, 2006, pp. 7-9; Tamarit, 2000, p. 67):

- Primera Línea: Exceso de aire
Tipo de combustible

- Tipo de chimenea
- Tipo de quemador
- Segunda Línea: Limpieza del intercambiador (deshollinado)
Cambio de quemador
- Tercera Línea: Cambio del área de transferencia
(Prácticamente cambio de equipo)
- Cuarta Línea: Cambio de combustible

1.4.2 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

Las características de diseño del horno de quema de cerámicos son importantes porque permiten determinar las condiciones a las cuales se encuentran las piezas durante el proceso de combustión y se detallan a continuación:

- Diseño de salida: 1 818 piezas por día
- Número de vagonetas en el horno: 51
- Producto: Material sanitario para cocción por fuego
- Dimensiones de la vagoneta de carga : 277,49 cm de ancho con 76,20 cm de alto y 127,00 cm de largo
- Condiciones de los ventiladores: Presión
Caudal
- Condiciones de atomización: Cambio de bomba
Instalación de pre-calentadores

- Longitud del horno: 64,01 m
- Condiciones de tiro de la chimenea: Aumento de su diámetro
Aumento de su altura
Disminución de pérdidas

De todo esto se puede concluir entonces que para analizar un ahorro energético en un horno de quema de cerámicos no se requieren cambios del procesos o grandes inversiones, sino más bien simples modificaciones en las condiciones de operación (Gutierrez y Fernández, 2001, pp. 165-166).

Por lo tanto, en la operación y el diseño se encuentran todas las opciones para mejorar la combustión, pero al final, es un análisis beneficio/costo lo que da la decisión.

1.4.3 MEDIDAS PARTICULARES A TOMAR

Es importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones de operación en el horno durante la cocción de las piezas ya que de ello depende la eficiencia del proceso (Gómez, 2009, p. 204):

- No permitir diferencias de temperatura entre la salida de la chimenea y la temperatura del proceso mayores a 100-150 °C.
- Limpiar las superficies de calor periódicamente.
- Disminuir las pérdidas de calor en los gases de chimenea.
- Controlar los aumentos progresivos de temperatura de la chimenea mediante toma de muestras de forma periódica.
- En los quemadores a gas, mantener el rango de presión del combustible en los valores dados por el fabricante.
- Vigilar el tamaño, forma y color de la llama.
- Mantener el exceso de aire en los valores recomendados como se indica en el Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Excesos de aire recomendados para lograr una buena combustión en el hogar

COMBUSTIBLE	VALOR RECOMENDADO (%)
Gas Natural	10
Gas Licuado de Petróleo	15
Bunker	25
Diesel	35
Fuel Oil	20-30

(Reed, 1986, p. 798)

- No permitir niveles de CO mayores de 400 ppm (partes por millón) ya que eso implicaría una mala combustión dentro del horno.
- Precalentar el aire que va a ingresar a la combustión con el calor residual de la chimenea.
- Llevar registros generales de la combustión, como presión, temperatura, aire y combustible.
- Revisar y limpiar boquillas de quemadores periódicamente.
- Revisar que la relación aire/combustible se puede controlar de forma considerable.

1.4.4 OBJETIVOS DE LA OPERACIÓN DEL HORNO

La correcta operación del horno tipo túnel involucra un cuidadoso balance en los ingresos y salidas de aire y combustible, además el horno necesita suficiente combustible para calentar la carga y superar todas las pérdidas desde el horno; es por esto que el volumen de aire debe suplir la combustión en los quemadores, enfriamiento de la carga y la atmósfera demandada en el horno.

También es importante que los productos de combustión y aire de enfriamiento sean evacuados del horno, lo que se realiza desde el ventilador de los productos de combustión en el extremo de la entrada del horno. Esto nos permite:

- Producir materiales cocidos de primera calidad.
- Alcanzar la mejor uniformidad en la temperatura en la carga.
- Consumir las mínimas cantidades posibles de combustible y electricidad.

2. METODOLOGÍA

2.1 DIAGNÓSTICO INICIAL DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL HORNO TIPO TÚNEL

La incidencia de la relación aire/combustible dentro de un proceso de combustión se refleja en la emisión de los gases que forman parte del producto de la reacción que son evacuados por la chimenea, temperatura de salida de los mismos y también en el ahorro energético del horno que es el objetivo principal del presente proyecto de titulación.

Debido a esto, se evaluó en primer lugar el estado inicial del horno mediante un balance de masa para cuantificar los flujos de entrada y salida de aire que permitió determinar el aire utilizado tanto para el enfriamiento de las piezas como para la combustión y de esta manera, poder conocer posteriormente la cantidad de aire requerido para obtener una combustión completa y determinar el exceso de oxígeno que ingresaba al proceso, lo cual influye directamente en la producción de gases contaminantes a la atmósfera, en sus concentraciones y en el consumo de energía requerido durante el funcionamiento del horno.

De igual forma se determinó mediante el balance energético del horno el calor consumido durante el proceso y los costos que implican el funcionamiento del horno bajo las condiciones iniciales de operación.

2.1.1 ACONDICIONAMIENTO DE LOS PUERTOS DE MUESTREO

Para la cuantificación de los flujos de aire en el horno se tomaron medidas de la caída de presión y temperatura en las corrientes de entrada y salida del aire que formaban parte del proceso de combustión, las mismas que se encontraban colocadas como se indica en la Figura 2.1 e identificadas por zonas de la siguiente manera:

- Corrientes de entrada:
 - combustible
 - aire de combustión
 - aire para el enfriamiento rápido
 - aire para el enfriamiento intermedio
 - aire para el enfriamiento lento

- Corrientes de salida:
 - aire caliente recuperado
 - gases de combustión

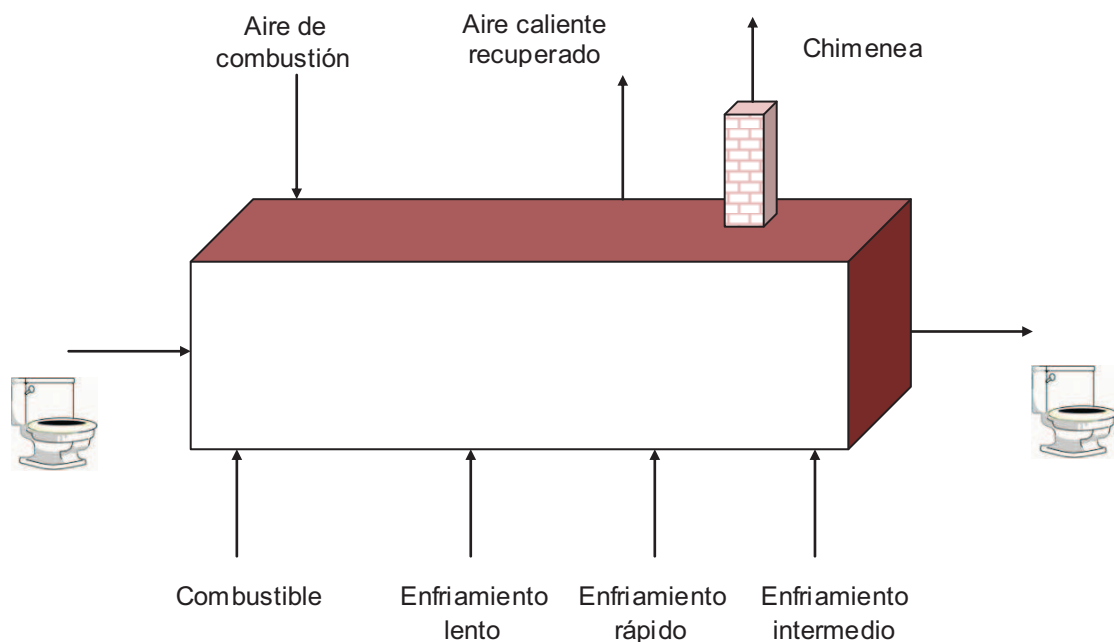


Figura 2.1. Esquema de las zonas de entrada y salida de aire en un horno tipo túnel

Una vez identificados los puertos de muestreo, se procedió a su acondicionamiento tomando en cuenta su ubicación y características.

En el caso de la chimenea por donde son evacuados los gases de combustión sin embargo, la adecuación de los puertos de muestreo ya se encontraba hecha debido a que en esta zona se toman los datos de las concentraciones de los gases producidos por la combustión constantemente para llevar un control de la reacción, por lo que únicamente se verificó que cumplan con las especificaciones indicadas en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (Tulas),

Libro VI, Anexo 3, numeral 4.2.2.1 para la plataforma de trabajo como se indica en la Figura 2.2.

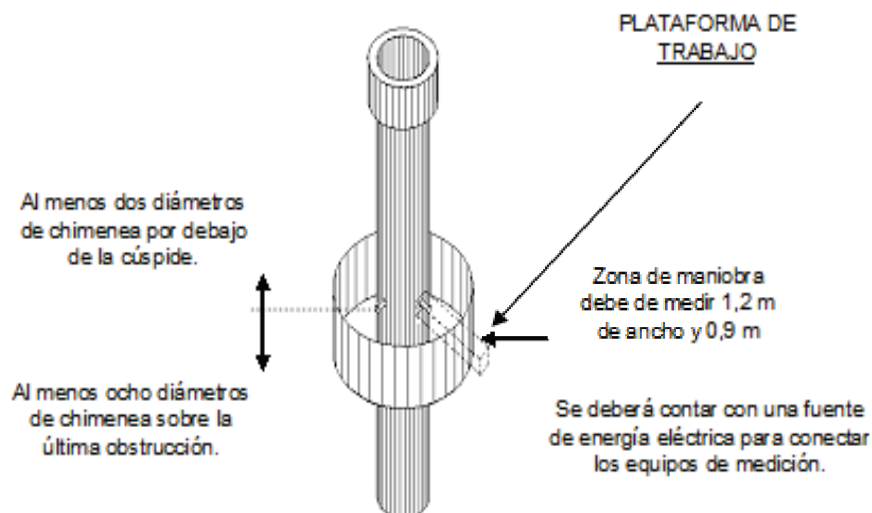


Figura 2.2. Plataforma de trabajo para el monitoreo de los gases de combustión

Para las corrientes de entrada y salida del aire que interactúan en el proceso de combustión, se adaptaron los puertos de muestreo a cada zona de aire considerando que se encuentren a una distancia prudente de la última perturbación para mantener un flujo estacionario que permita obtener datos representativos para los cálculos, ya que si existe alguna perturbación, el flujo se vuelve turbulento y los datos serían bastante variables y poco confiables.

2.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

Las lecturas de las velocidades y de las temperaturas en cada puerto de muestreo fueron realizadas con el Testo 335 representado en la Figura 2.3, equipo de medición que permite el análisis de la caída de presión, temperatura, gases de combustión y su funcionamiento se basa en la utilización de sensores electroquímicos adecuados de tal manera que se pueda determinar el contenido de oxígeno y constituyentes nocivos del gas de combustión tales como CO, SO₂ o NO_x, basándose en el principio de la valoración potenciométrica sensible a los iones (Instrumentos de Medición para Productos de la Combustión y Emisiones,

2009, p.2-3).

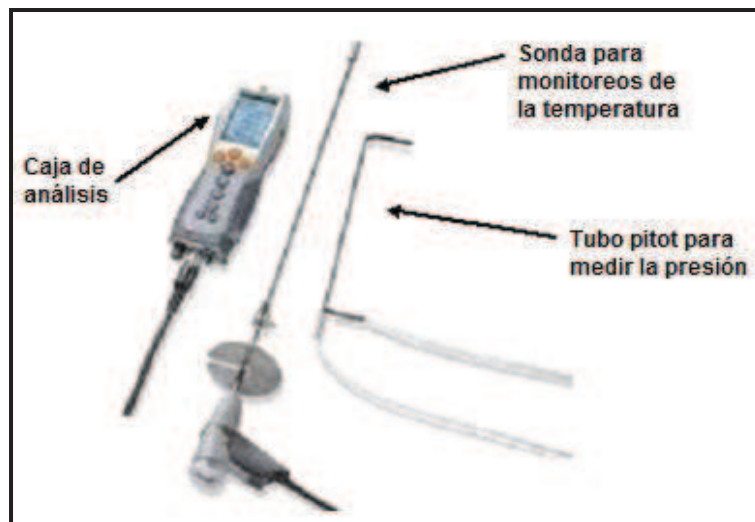


Figura 2.3. Equipo utilizado para la toma de medidas de emisiones industriales junto con sus accesorios

Estos sensores están rellenos con un electrolito acuoso, definido para cada gas, en el que están dispuestos dos o tres electrodos, igualmente combinados específicamente, entre los que hay un campo eléctrico y se encuentran sellados en el exterior mediante membranas permeables al gas como se puede observar en la Figura 2.4 donde se ha representado uno de los sensores utilizados para el análisis de la concentración del O_2 en el aire que ingresa a la cámara de combustión (Instrumentos de Medición para Productos de la Combustión y Emisiones, 2009).

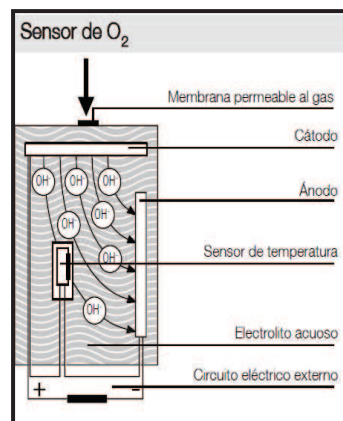


Figura 2.4. Representación gráfica del sensor de O_2 utilizado en el Testo 335

Además de lo indicado anteriormente, los sensores utilizados en este equipo tienen múltiples ventajas en aplicaciones portátiles debido a que no se ven afectados por vibraciones o cambios de temperatura y poseen estabilidad en todo el rango de medición.

2.1.3 TOMA DE DATOS DE LA VELOCIDAD

Una vez acondicionados los puertos de muestreo, se tomaron las lecturas de la velocidad y presión en cada uno de ellos, para lo cual, se trabajó de la siguiente manera:

- Se introdujo el tubo Pitot especificado en la Figura 2.5 en el puerto de medición de cada zona del horno por aproximadamente 10 minutos hasta obtener valores constantes de velocidad, buscando el flujo laminar de cada corriente y se tomaron los datos de la lectura de la velocidad, temperatura, presión y humedad.

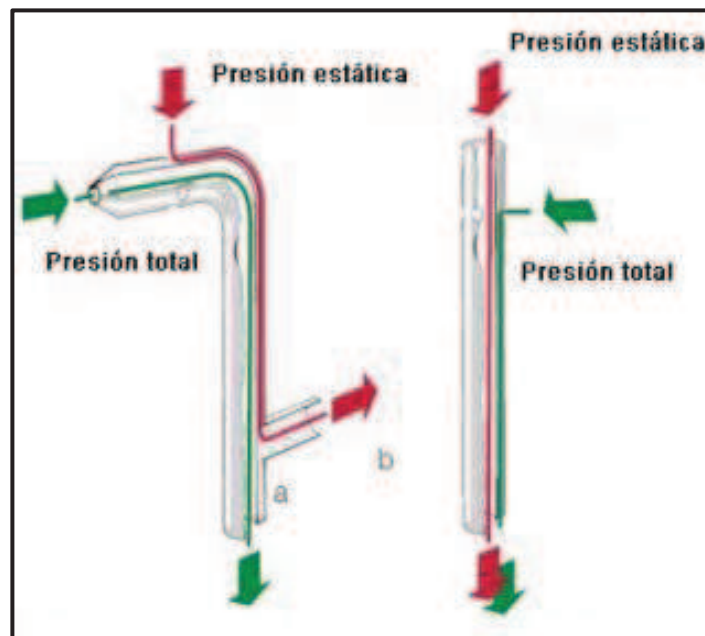


Figura 2.5. Tubo Pitot utilizado para medir la presión en los flujos de aire

- Se determinó la presión promedio en cada zona de flujo de aire, considerando

las constantes especificadas en la Tabla 2.1 para la ecuación de velocidad delgas de la chimenea (Ministerio del Ambiente, 1999, pp. 387-389).

Tabla 2.1 Valores de las constantes de la ecuación de velocidad para el aire

CONSTANTE	VALOR
Kp	34,97
Cp	0,84
Ms	28,84

(Ministerio del Ambiente, 1999, p. 390)

Para esto se utilizó además la Ecuación [2.1] que se detalla a continuación (Ministerio del Ambiente, 1999, pág. 398):

$$V = k_p \times C_p \times \sqrt{\Delta P} \times \sqrt{\frac{T_s}{P_s \times M_s}} \quad [2.1]$$

Donde:

- V : velocidad del gas en chimenea (m/s)
- Kp : constante de la ecuación de velocidad (34,97)
- Cp : coeficiente del tubo Pitot (adimensional)
- ΔP : presión dinámica promedio (mm H₂O)
- M_s : peso molecular del gas en chimenea (g/gmol)
- T_s : temperatura absoluta del gas en chimenea (°K)
- P_s : presión total absoluta en chimenea = presión total en la chimenea menos la caída de presión (mm Hg)

2.1.4 CÁLCULO DE LOS FLUJOS VOLUMÉTRICOS Y MÁSICOS

Para conocer y analizar el flujo real de aire que interviene en todo el proceso de calentamiento, cocción y enfriamiento de las piezas cerámicas, se siguió el

siguiente procedimiento considerando para el efecto el flujo de aire de cada zona del horno:

- Con los valores de la velocidad obtenidos de cada tubería por donde circula todo el aire que interviene en el proceso, se calculó el flujo volumétrico de aire experimental de las corrientes de entrada y salida del aire que participa en la combustión y en el enfriamiento de las piezas.
- Posteriormente se calculó el flujo másico del aire en las corrientes de entrada y salida del horno analizando su densidad a las condiciones de presión y temperatura a las que fueron tomados los datos de velocidad.
- En la chimenea del horno fue necesario tomar en cuenta también el porcentaje de los gases que forman parte del producto para determinar el peso molecular, debido a que este aire se encuentra formado adicionalmente por los gases producidos por la reacción como se indica en la Ecuación [2.2] (Ministerio del Ambiente, 1999, p. 389):

$$Md = 0,44 \%CO_2 + 0,32 \%O_2 + 0,28 \%CO + 0,28 \%N_2 \quad [2.2]$$

Donde:

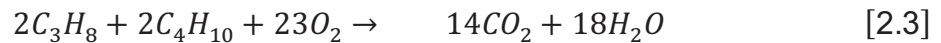
Md : peso molecular seco del gas de chimenea (kg/kmol)

- A continuación se aplicó el balance de masa al horno que fue desarrollado en el Anexo II, para determinar la cantidad másica de aire real que era utilizado durante la reacción de combustión del GLP (Himmelblau, 1988, p. 298).

2.1.5 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE EXCESO DE AIRE

Partiendo de la relación estequiométrica de combustión del GLP detallada en la Ecuación [1.10] que se encuentra en la página 27 del capítulo de Revisión

Bibliográfica, se calculó posteriormente la relación teórica de aire necesaria para reaccionar con un m³ de combustible y obtener una combustión completa, considerando al propano y butano como los componentes principales del GLP ya que los demás componentes se encuentran en proporciones muy pequeñas no representativas dentro de la reacción estequiométrica.



Una vez determinada la relación aire/combustible de la reacción de combustión y considerando el flujo de GLP que ingresa al proceso, se calculó la cantidad de aire teórico necesario para que se consuma todo el GLP durante la combustión y la generación de agua en forma de vapor producto también de la reacción.

Posteriormente se determinó la cantidad de oxígeno en exceso en la reacción aplicando la Ecuación [2.4] y de esta manera se pudo conocer si la reacción que se estaba desarrollando dentro del proceso de combustión era incompleta o tenía una gran cantidad de oxígeno en exceso; lo cual permitió posteriormente realizar correcciones en los flujos de entrada de aire y combustible a la reacción.

$$O_2 \text{exceso} = \frac{Wa' - Wa}{Wa} \quad [2.4]$$

Donde:

Wa : cantidad de aire teórico (kmol/h)

Wa' : cantidad de aire práctico (kmol/h)

2.2 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES TÉCNICAS NECESARIAS PARA MEJORAR LA OPERACIÓN DEL HORNO

Luego de haber determinado las condiciones iniciales de operación del horno,

como son el consumo de aire y los flujos másicos del aire utilizados para todo el proceso de cocción de las piezas cerámicas dentro del horno, se realizó un análisis de las consideraciones de operación del mismo con el fin de modificar las condiciones técnicas necesarias para mejorar su funcionamiento y disminuir la producción de gases contaminantes.

2.2.1 CONSIDERACIONES DE OPERACIÓN PARA EL HORNO

El horno tipo túnel en el cual se realizó el presente proyecto de titulación se encuentra esquematizado en el Anexo I y es utilizado para llevar a cabo la cocción de material cerámico utilizando GLP como combustible para lo cual trabaja siguiendo los objetivos detallados a continuación (Gómez, 2009, p. 229):

- Consumir las mínimas cantidades posibles de combustible y electricidad.
- Alcanzar la uniformidad en la temperatura de la carga, por esta razón se trabaja con tres zonas bien definidas que son: zona de precalentamiento, zona de cocción y zona de enfriamiento.

Es por estas razones que debe operar siempre bajo las siguientes condiciones:

Ciclo de cocción:	13 horas
Temperatura de entrada de las piezas:	38 °C
Temperatura de salida de las piezas:	81 °C
Potencia del horno:	961 HP
Consumo de combustible:	118,18 kg/h
Temperatura máxima de operación:	1 200 °C

2.2.2 MEDICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Durante la toma de las muestras de la velocidad en cada puerto de muestreo, se

realizaron también mediciones periódicas de la presión de entrada del aire utilizado para la combustión en los quemadores del horno, verificando de esta manera que el flujo másico del mismo se mantenga constante con la finalidad de conservar una reacción estable y evitar de esta manera el incremento en las concentraciones de los gases de combustión.

Conjuntamente con el análisis de los flujos volumétricos del aire y de la presión de entrada de los flujos participantes en la reacción, se realizó un análisis visual de la llama en un quemador piloto que representaba la acción de los demás quemadores que se encuentran dentro del horno tipo túnel, con la finalidad de determinar como punto de partida a través de la observación si se estaba produciendo una buena combustión o si existía alguna deficiencia de uno de sus componentes mediante el análisis de la llama como se indicó en el capítulo referente a Revisión Bibliográfica, numeral 1.3.1.2.

El análisis visual de la llama es un primer indicador del estado de la combustión y se lo considera necesario ya que permite establecer de manera preliminar, si se está o no manteniendo una adecuada reacción en los quemadores y por ende permite realizar los ajustes necesarios durante el proceso para mejorar su eficiencia.

2.2.3 MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

Para la determinación de la eficiencia de la combustión se realizó el análisis del calor total requerido teóricamente para el proceso mediante la Ecuación [2.5] detallada a continuación:

$$Q_T = W_c \times PCS \quad [2.5]$$

Donde:

Q_T : calor total requerido para todo el proceso (kJ/h)

- W_c : flujo másico del GLP que ingresa a la combustión (kg/h)
 PCS : poder calórico superior del GLP (kJ/kg)

Posteriormente se realizó el balance de energía del horno de quema de cerámicos para conocer el calor real utilizado durante el proceso de combustión para la cocción de las piezas, siendo necesario proceder de la siguiente manera (Mills, 1999, p. 98).

2.2.3.1 Balance de energía del horno de quema de cerámicos

La caracterización del rendimiento energético es importante debido a que permite optimizar el uso de energía y economizar recursos; por esta razón, se partió del balance de energía indicado en la Ecuación [2.6] en el cual se establece que el calor disponible para la cocción de las piezas cerámicas es producto de la suma de todos los calores generados durante el proceso de combustión (Gómez, 2009, p. 221).

$$Q_{real} = Q_{pi} + Q_{pp} + Q_{ab} + Q_{gc} \quad [2.6]$$

Donde:

- Q_{real} : calor real disponible en el horno (kJ/h)
 Q_{pi} : calor absorbido por el producto (kJ/h)
 Q_{pp} : pérdida de calor al ambiente (kJ/h)
 Q_{ab} : calor perdido por radiación (kJ/h)
 Q_{gc} : calor transportado por los gases de combustión (kJ/h)

Para el balance de energía se seleccionaron los elementos que se consideró pueden ganar o perder calor durante la combustión, los cuales se encuentran representados en el Anexo II, donde se ha esquematizado las entradas y salidas de los diferentes tipos de energías que se encuentran aportando al sistema (Gómez, 2009, p. 205).

2.2.3.2 Calor absorbido por el producto

El calor absorbido por las piezas cerámicas se calculó con la Ecuación [2.7] que se encuentra detallada a continuación tomando en cuenta las condiciones a las que debe operar el horno y el área bajo la curva de las mediciones de temperatura en el horno ya que se considera que este calor absorbido por las piezas cerámicas se encuentra en régimen transitorio:

$$Q_{pi} = m_p \times C_{p_i} \times \int_{T_n}^{T_{n+1}} f(x) dx \quad [2.7]$$

Donde:

- m_p : masa total de las piezas cerámicas o de la carga que ingresa al proceso (kg/h)
- C_p : calor específico de las piezas (kJ/kg* °C)
- $f(x)$: temperatura medida con la termocupla en función de cada zona del horno (°C)
- T_n : número de mediciones realizadas con la termocupla dentro del horno de quema de cerámicos
- x : distancia entre cada termocupla dentro del horno

2.2.3.3 Calor perdido hacia el ambiente

El cálculo del calor perdido por las paredes del horno se analizó utilizando los factores de forma para la conducción al tratarse de un problema de flujo de calor multidimensional entre dos superficies, las cuales se analizan a temperatura uniforme; por lo tanto, si existieran otras superficies, estas se serían adiabáticas (Mills, 1999, pp. 326-329).

Los factores de forma permitieron conocer el calor por conducción obtenido entre las paredes del horno, comparándolo con una caja rectangular (simulación del

horno de quema de cerámicos) donde la temperatura de pared y el espesor de la misma son uniformes. Se realizaron los cálculos considerando también las propiedades internas y externas del horno para determinar el calor que se perdía a través de sus paredes debido a la pérdida de calor, utilizando la Ecuación [2.8] (Mills, 1999, p. 331):

$$Q_{pp} = k \times S \times (T_o - T_1) \quad [2.8]$$

Donde:

- k : conductividad térmica del material del que está compuesta la pared (kJ/h)
- S : factor de forma tomando en cuenta las aristas, las esquinas y las paredes (m)
- To : temperatura de la superficie exterior del horno (°C)
- Ti : temperatura de la superficie interior del horno (°C)

El factor de forma (S) que permite definir la geometría del sistema se calculó a partir de las propiedades dimensionales del horno, las cuales se encuentran agrupadas en la Tabla 2.2, representadas según la Ecuación [2.9] y graficadas como se puede observar en el Figura 2.6 considerando al horno como una caja rectangular, mientras que la conductividad térmica del material depende de la estructura del mismo y de la presión y temperatura a la cual se encuentre desarrollándose el proceso de cocción de las piezas cerámicas dentro del horno (Mills, 1999, p. 332; Incropera y Witt, 2002, p. 225).

Tabla 2.2. Dimensiones del horno de quema de cerámicos

Propiedad	Valor(m)
Δx	0,23
L	52,8
B	2,2
H	0,87

$$S = \frac{A}{\Delta x} + 0,54 \times \sum L + 1,2 \times \Delta x \quad [2.9]$$

Donde:

- b : base o ancho del horno (m)
- A : área superficial interna (m²)
- b : base o ancho del horno (m)
- h : altura del horno (m)
- Δx : espesor de las paredes (m)
- L : longitud del horno (m)

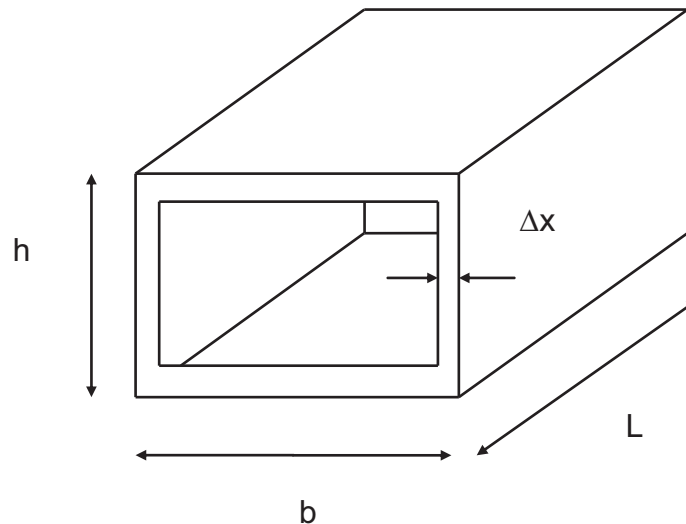


Figura 2.6. Diagrama para determinar el factor de forma (S)

2.2.3.4 Calor perdido por radiación

El análisis energético dado por la radiación través del horno tipo túnel, se realizó considerando a la chimenea por donde salen los gases producto de la reacción de combustión como la principal fuente de emisión de calor, por lo tanto dichas pérdidas se calcularon mediante la Ecuación [2.10].

$$Q_{ab} = \sigma \times \varepsilon \times A_e (T_G^4 - T_\infty^4) \quad [2.10]$$

Donde:

- σ : constante de Stefan - Boltzman ($4,88 \times 10^{-8} \text{kcal/h} \times \text{m}^2 \times \text{°C}^4$) (Incropera y Witt, 2002, pág. 221)
- T_G : temperatura de los gases dentro del horno (°C)
- T_{∞} : temperatura ambiente (°C)
- h : altura de la chimenea (m)
- ε : emisividad de las paredes del horno (0,75 – ladrillo refractario) (Borman, 1998, pág. 431)
- A_e : área total de la chimenea por donde salen los gases de combustión (m^2)

2.2.3.5 Calor transportado por los gases de combustión

Para la determinación del calor producido por los gases de combustión, se utilizó la Ecuación [2.11] tomando como dato la masa de los gases que salen por la chimenea obtenida del monitoreo de los flujos de aire en el diagnóstico inicial de operación del horno .

$$Q_{gc} = m_{gc} \times C_{p_{gc}} \times (T_1 - T_i) \quad [2.11]$$

Donde:

- $C_{p_{gc}}$: calor específico de los gases de combustión ($\text{kJ/kg} \times \text{°C}$)
- m_{gc} : flujo másico de los gases de combustión (kg/h)
- T_i : temperatura del aire a la entrada del quemador (°C)
- T_1 : temperatura de los gases de combustión (°C)

2.2.3.6 Cálculo de la eficiencia de la combustión

Para conocer la eficiencia de la combustión a las condiciones iniciales, una vez determinado el calor real generado por el funcionamiento del horno se procedió a

utilizar la Ecuación [1.6] descrita en el capítulo referente a Revisión Bibliográfica, literal 1.2.3.

En dicho literal se analiza el calor real generado por el horno durante el proceso de combustión en función del flujo real de combustible que ingresa al sistema y su poder calorífico para conocer en porcentaje el real aprovechamiento de las propiedades del combustible durante el proceso de cocción de las piezas cerámicas.

2.3 IMPLEMENTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO

Como parte de las alternativas para disminuir el consumo de combustible para la cocción de las piezas cerámicas se propuso la instalación de una resistencia eléctrica, en este caso una niquelina representada en la Figura 2.7, la cual se ubicó a la entrada del aire que ingresaba al quemador de análisis para reaccionar con el GLP.

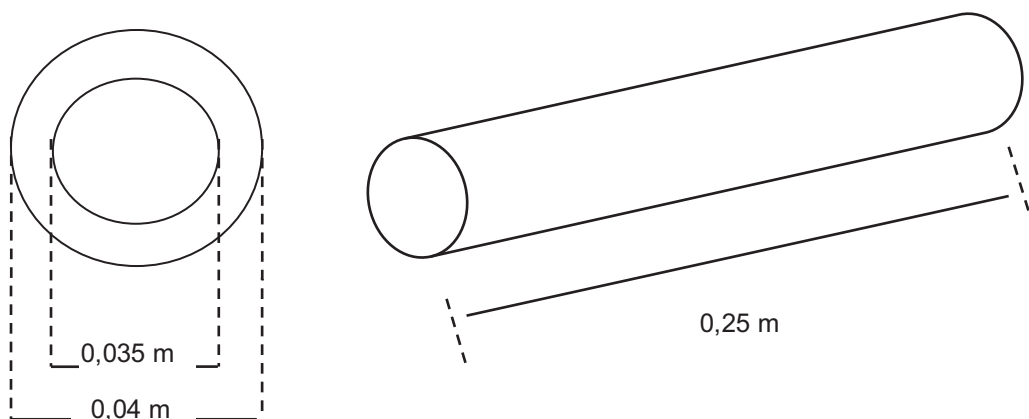


Figura 2.7. Dimensiones de la resistencia eléctrica utilizada para precalentar el aire que ingresa al quemador en el horno de quema de cerámicos

Se tomaron además las medidas de la resistencia eléctrica especificadas en la Figura 2.7 como referencia para los cálculos, la misma que fue conectarla a la corriente eléctrica para su funcionamiento.

Con esta modificación se realizó nuevamente el análisis de los flujos y de la emisión de los gases contaminantes obtenidos para así poder determinar si era factible la disminución de la cantidad del combustible que ingresaba al horno y disminuir el consumo energético del horno sin afectar a la calidad de las piezas al momento de calentar el aire que ingresaba a la reacción (Gómez, 2009, p. 231).

A continuación se determinó el valor de la resistencia del material conductor aplicando para el efecto la Ley de Ohm como se indica en la Ecuación [2.12], siendo la constante de proporcionalidad una magnitud que va a depender del material conductor y que se denomina coeficiente de resistividad de la sustancia o material conductor (ρ).

$$R = \rho \times \frac{L}{S} \quad [2.12]$$

Donde:

- R : resistencia del material (Ω)
- L : longitud del conductor (m)
- ρ : coeficiente de resistividad del conductor ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

Posteriormente se analizó la transformación energética que se produjo en el sistema, ya que la energía eléctrica dada por la resistencia se convirtió en calor que a su vez se transfirió al aire que ingresa a los quemadores precalentándolo antes de formar parte de la reacción. Por lo tanto se utilizó la Ley de Joule, aplicada a un circuito eléctrico elemental, expresada en la Ecuación [2.13] (Gómez, 2009, p. 25):

$$P = V \times I \quad [2.13]$$

Donde:

- P : potencia generada por el material conductor (kcal/h)
- V : Voltaje (V)

I : intensidad del material (Ω)

El voltaje es entonces igual a la resistencia de la niquelina por la intensidad como lo explica también a Ley de Ohm de la Ecuación [2.14], y la potencia de la resistencia utilizada se calculó como se indica en la Ecuación [2.15] (Tamarit, 2000, p. 67):

$$V = R \times I \quad [2.14]$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad [2.15]$$

A continuación se realizó la proyección de la potencia obtenida para los 28 quemadores que funcionan dentro del horno, la misma que fue considerada dentro de la sumatoria del calor requerido luego de modificar las condiciones de operación del horno para determinar su incidencia en el ahorro energético que se esperaba al finalizar el proyecto.

2.3.1 MEDICIONES REALIZADAS PARA EL DIAGNÓSTICO FINAL DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL HORNO

Una vez colocada resistencia eléctrica a la entrada del quemador de prueba para realizar el precalentamiento el aire de combustión, se procedió a realizar modificaciones en los flujos de entrada de aire y de combustible al quemador para determinar las mejores condiciones finales de operación del horno de quema de cerámicos.

Para llevar un control de estas modificaciones realizadas, se tomaron datos de la velocidad en cada zona de entrada y salida de aire hacia el proceso de cocción y de la concentración de contaminantes generados por la combustión, donde se consideró la generación de CO por ser el principal componente nocivo de los gases formados por una combustión incompleta.

Dichas modificaciones se llevaron a cabo con el propósito de reducir el flujo de aire conjuntamente con la reducción del combustible que ingresaba al hogar para de esta manera mejorar la combustión dentro del quemador. Como consecuencia de ello, se esperaba disminuir la concentración de contaminantes que salen a través de la chimenea y de forma simultánea disminuir también el consumo de energía necesaria para producir la reacción de combustión.

2.4 ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROYECTO

El análisis económico del proyecto permitió determinar los costos que implican tanto el funcionamiento del horno como los recursos necesarios para obtener piezas cerámicas de buena calidad, por lo tanto, se realizaron los cálculos de los costos de los insumos utilizados diariamente en el proceso y se los comparó con los resultados obtenidos luego de colocar la resistencia eléctrica en el quemador.

Esto además permitió conocer si el precalentamiento del aire que ingresa a los quemadores para la combustión del GLP es una opción rentable para el ahorro energético dentro del funcionamiento del horno que fue el principal objetivo del estudio.

2.4.1 CONSUMO ENERGÉTICO DEL HORNO DE QUEMA DE CERÁMICOS

Tomando en cuenta el costo del GLP utilizado en función del consumo del horno para su funcionamiento diaria y expresado en la Ecuación [2.16], considerando también que la empresa donde se realizó el estudio no recibe ningún subsidio y el precio del Kwh que se encuentra en vigencia en el Ecuador, se realizó el cálculo del consumo de energía necesaria para el funcionamiento del sistema al inicio del estudio y luego de la modificación realizada.

Esto se puede apreciar en la Ecuación [2.17] a lo cual se agregó el consumo de

energía necesario para el precalentamiento del aire a través de la resistencia eléctrica instalada en el quemador de análisis como se puede apreciar en la Ecuación [2.18].

$$\text{costo}_{GLP} = m_{comb} \times \text{precio}_{GLP} \quad [2.16]$$

$$\text{costo}_{energético} = Qd \times \text{costo}_{GLP} \times \text{precio}_{Kwh} \quad [2.17]$$

$$\text{costo}_{niquelina} = P \times \text{precio}_{Kwh} \quad [2.18]$$

Donde:

Qd : calor disponible del horno (kJ/h)

P : potencia (kJ)

2.4.2 BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL HORNO

Para determinar si el proyecto resulta rentable, se realizó el análisis de los ingresos obtenidos por las ventas de las piezas cerámicas a condiciones normales de funcionamiento y luego de implementar la adecuación, considerando el tiempo de funcionamiento del horno y la cantidad de piezas cerámicas promedio obtenidas diariamente del proceso, para lo cual se analizó el proceso tomando en cuenta que diariamente este horno produce 1 880 piezas entre inodoros, lavabos, urinarios y accesorios.

2.4.2.1. Costo de operación del horno

Para el análisis del costo de operación del horno, se tomó en cuenta la inversión total que se requiere para su funcionamiento y el costo de operación diario en comparación con las condiciones de operación que representaría la modificación analizada, es decir, se analizó dentro de los costos de operación del horno el

consumo de combustible, materia prima, mano de obra y consumo de energía dentro del proceso productivo.

2.4.2.2. Beneficio/Costo de la operación del horno

El análisis financiero se realizó utilizando la Ecuación [2.19] que no es más que el coeficiente entre el beneficio de la operación del horno y el costo de la operación del mismo incluyendo los gases de la implementación de la resistencia eléctrica dentro del proyecto:

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum VP (+)}{\sum VP (-)} \quad [2.19]$$

Donde:

$\Sigma VP (+)$: sumatoria de los ingresos mensuales por la venta de las piezas cerámicas (USD/mes)

$\Sigma VP (-)$: sumatoria de los egresos mensuales por la fabricación de las piezas cerámicas (USD/mes)

Una vez determinado el valor del beneficio/costo, se procedió a analizar si el proyecto realizado es beneficioso o no para la empresa, utilizando para este fin las siguientes relaciones:

- $B/C > 1$ proyecto viable
- $B/C = 1$ proyecto irrelevante
- $B/C < 1$ proyecto no viable

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DIAGNÓSTICO INICIAL DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL HORNO TIPO TÚNEL

El diagnóstico inicial del horno donde se realizó el estudio, permitió determinar la cantidad de aire y energía utilizados diariamente en el proceso de combustión para comprobar el tipo de reacción dada en el proceso antes de realizar calibraciones en los flujos de entrada de los componentes de la combustión e implementar la modificación propuesta y de esta manera realizar un análisis económico inicial del consumo energético del horno.

3.1.1 UBICACIÓN DE LOS PUERTOS DE MUESTREO

Para la ubicación de los puertos de muestreo se identificaron las zonas de entrada y salida de aire y se realizaron las adecuaciones necesarias como se puede apreciar en la Figura 3.1.

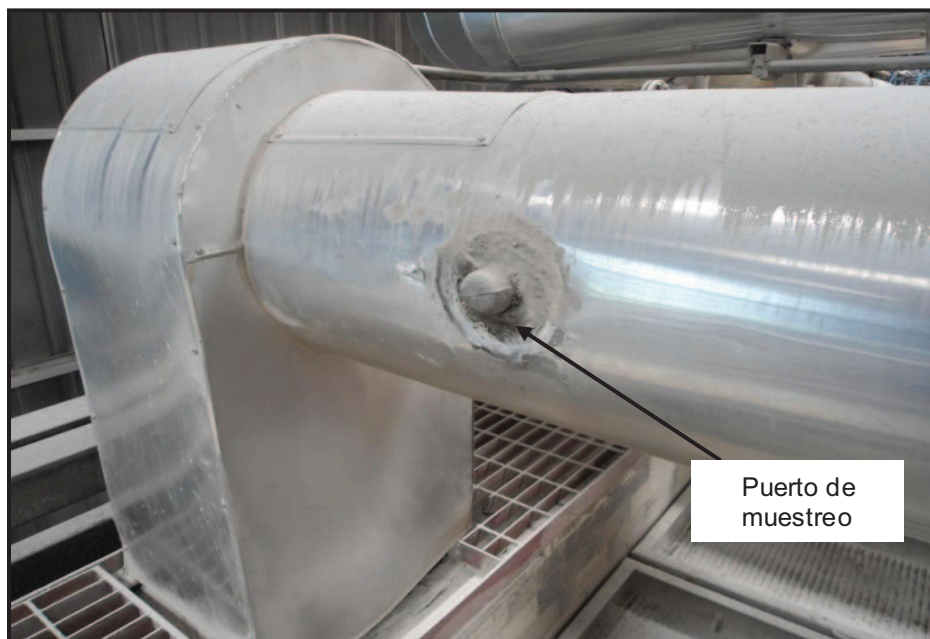


Figura 3.1. Puerto de muestreo para el aire de atomización

En el gráfico anterior se encuentra especificada la adecuación construida para el ducto por donde ingresa el aire que va a permitir el enfriamiento de las piezas cerámicas una vez que ingresan a la zona de enfriamiento lento, considerando la distancia requerida para colocar un puerto de muestreo tomando en cuenta también la última perturbación y el diámetro de la tubería por donde circula el flujo, de la misma forma se procedió para las otras zonas por donde se analizaron los flujos de aire que intervienen en todo el proceso de cocción de las piezas dentro del horno.

Adicionalmente, en la Figura 3.2 se observa la chimenea que es parte del horno de quema de cerámicos y que ha sido adecuada con anterioridad para el monitoreo de los gases de combustión con las especificaciones indicadas en el TULAS, libro VI, anexo III, numeral 4.2.2.1.

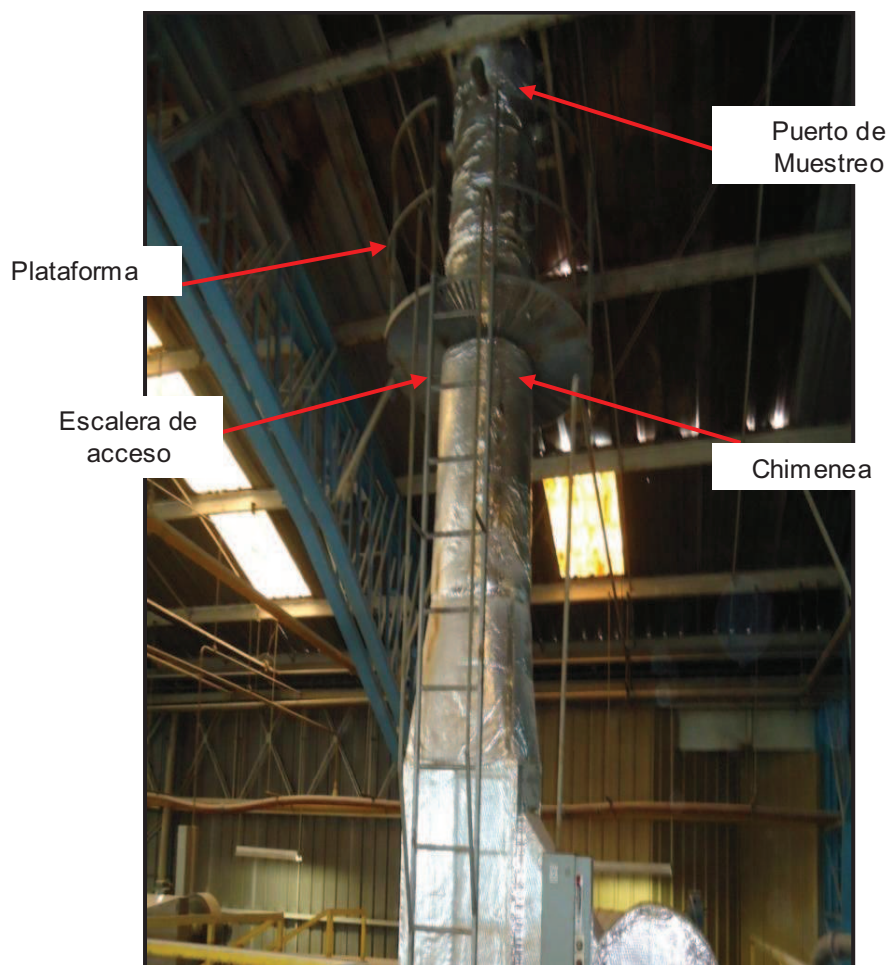


Figura 3.2. Chimenea para el monitoreo de los gases de combustión

En la Tabla 3.1 se encuentran agrupados los datos tomados de la chimenea por donde salen los gases producto de la combustión con la finalidad de poder realizar los cálculos del flujo másico y calor generado debido a la reacción y que permiten conocer la concentración de los gases producidos y que son además contaminantes a la atmósfera y el flujo de aire real consumido durante todo el proceso.

Tabla 3.1. Datos de la chimenea en el horno de quema de cerámicos

DATOS DE LA CHIMENEA	(m)
Diámetro	0,64
Distancia antes de la última perturbación	3,10
Distancia después de la última perturbación	4,60
Longitud de la chimenea	12,08

3.1.2 CÁLCULO DEL FLUJO MÁSIKO DE AIRE UTILIZADO DURANTE LA COMBUSTIÓN

Para el cálculo del flujo másico de aire utilizado durante la combustión, se procedió a tomar las mediciones de la caída de presión, temperatura y humedad del aire en cada zona donde se adecuaron los puertos de muestreo y posteriormente se aplicó la Ecuación [2.1] indicada en el capítulo de Metodología, literal 2.1.3.

Este cálculo se realizó para cada medida de aire tomada durante la evaluación de las condiciones de operación iniciales del horno antes de realizar las primeras calibraciones de los flujos de aire que ingresaba a los quemadores como se puede apreciar en el Anexo II.

De esta manera se obtuvieron los datos de las velocidades del aire tanto de entrada como de salida de cada ducto o zona del horno de quema de cerámicos que intervienen en el proceso, tanto en el calentamiento como en la cocción y en el enfriamiento de las piezas cerámicas, cuyos resultados se encuentran

esquemáticos en la Tabla 3.2 y que permitieron más adelante realizar el balance de masa inicial del sistema.

Tabla 3.2. Resultados del cálculo de la velocidad del aire consumido en el horno tipo túnel a condiciones iniciales

Zona de entrada del flujo de aire	Velocidad del gas (m/s)
Aire de combustión	30,63
Zona de enfriamiento lento	30,40
Zona de enfriamiento intermedio	29,73
Zona de enfriamiento rápido	29,83
Zona de salida del flujo de aire	Velocidad del gas (m/s)
Zona del aire caliente recuperado	29,27
Gases de combustión (chimenea)	28,91

Para obtener el peso molecular del aire que forma parte de los gases producidos por la combustión, adicionalmente fue necesario tomar los datos de la composición de los componentes del aire que sale de la chimenea y de la temperatura de salida como indica la Tabla 3.3 y aplicar la Ecuación [2.2] que se encuentra explicada en el literal 2.1.4 del capítulo de Metodología (Ministerio del Ambiente, 1999, p. 389).

Estos datos de la composición de los gases de combustión fueron tomados tres veces al día durante dos semanas, debido a las condiciones de operación del horno al momento de ingresar un lote de piezas al proceso de cocción, las cuales eran ligeramente modificadas para mantener el entorno requerido dentro del horno hasta mantener una concentración de contaminantes relativamente constante.

Es importante mencionar que los datos del CO fueron obtenidos en ppm (partes por millón) que en el caso de los gases de combustión representa ml de contaminante por cada m³ de gas; por lo tanto se realizó el cálculo para reportar estos datos en mg de contaminante por cada m³ de aire medido a condiciones

normales como lo indica la Ecuación [3.1] que permite comparar el cumplimiento de la Ordenanza 213 y que fueron tabulados en la Tabla 3.3, la cual se encuentra detallada más adelante.

$$\frac{mg}{m^3} = ppm \times \left(\frac{21 - 7\%}{21 - \%O_2} \right) \times \rho_{contaminante \text{ a CN}} \quad [3.1]$$

Donde:

ppm : ml de contaminante por m³ de gas de combustión.

%O₂ : porcentaje de oxígeno del gas de combustión medido a condiciones normales de presión y temperatura.

CN : condiciones normales de presión y temperatura, es decir, 1 atm y 0°C.

7% : representa la cantidad de oxígeno utilizada para la corrección, es decir, 7% de O₂ como lo establece la Ordenanza 213.

Tabla 3.3. Resultados de las mediciones de los componentes de los gases de combustión durante el diagnóstico inicial de operación del horno

N° de medida	T (°C)	O ₂ %	CO ppm	CO mg/Nm ³	CO ₂ %	N ₂ %
1	123,8	19,23	109	461,00	2,07	80,08
2	121,3	19,11	111	440,48	1,89	79,99
3	119,6	19,02	102	386,36	2,08	80,09
4	119,9	18,97	95	350,99	2,15	80,19
5	118,7	18,84	93	322,92	2,19	80,17
6	117,4	18,82	93	319,95	2,21	80,07
7	117,2	18,80	92	313,64	2,15	80,20
8	115,9	18,76	91	304,69	2,20	79,99
9	114,9	18,72	91	299,34	2,10	80,17
10	113,6	18,71	90	294,76	2,12	80,11
11	113,1	18,65	89	284,04	2,15	80,22
12	110,5	18,64	89	282,84	2,02	80,00
13	109,6	18,63	91	287,97	2,06	80,01
14	110,3	18,62	90	283,61	2,01	80,34

Tabla 3.3. Resultados de las mediciones de los componentes de los gases de combustión durante el diagnóstico inicial de operación del horno (**continuación...**)

15	112,5	18,56	91	279,71	2,11	79,78
16	111,2	18,55	89	272,45	2,19	79,65
17	109,3	18,54	90	274,39	2,10	79,24
18	108,4	18,29	89	246,31	2,07	79,13
19	107,5	18,28	83	228,86	2,09	79,43
20	107,7	18,25	85	231,82	2,11	79,65
21	106,2	18,24	84	228,26	1,97	80,00
22	106,4	18,22	85	229,32	1,93	80,50
23	106,1	18,10	84	217,24	1,88	80,66
24	105,7	17,98	83	206,13	1,84	80,53
25	105,4	17,67	81	182,43	1,79	80,78

Los datos de la composición de los gases de combustión en la chimenea fueron recopilados tomando en cuenta que primero se debía esperar a que se estableciera el flujo de aire antes de tomar cada medida para asegurar que la información recopilada fuera representativa debido a que se requiere que la combustión sea continua mientras se realizaba el diagnóstico inicial del proceso y por lo tanto se necesita establecer la ubicación dentro de la tubería donde el flujo se mantenga lineal y no turbulento (Reed, 1986, p. 687; García, 2001, p. 75).

Con la información proporcionada en la Tabla 3.2 y con la Ecuación [2.2] indicada en el capítulo de Metodología, numeral 2.1.4, que a su vez es utilizada según el TULAS para el cálculo del peso del aire que se utiliza en las diferentes zonas del horno para el calentamiento, cocción y enfriamiento de las piezas, se determinó que el peso del gas seco era de 29,04 kg/kmol y con este dato se obtuvo también el cálculo de la velocidad del aire que sale junto a los gases de combustión por la chimenea del horno.

Una vez determinada la velocidad en cada zona o ducto de aire que interviene en el proceso, se realizó el cálculo del flujo volumétrico tanto de las corrientes de entrada como de las corrientes de salida del aire que se utiliza durante el funcionamiento del horno para la cocción de las piezas cerámicas, para lo cual se

multiplicaron las velocidades calculadas anteriormente por el área transversal de cada tubería por donde circula el aire, obtenidas tomando de la medición de los diámetros de cada zona de aire y detalladas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Área transversal en cada zona del horno

Zona de entrada del flujo de aire	Diámetro (m)	Área transversal (m²)
Aire utilizado para la combustión	0,34	0,09
Zona de enfriamiento lento	0,41	0,13
Zona de enfriamiento intermedio	0,44	0,15
Zona de enfriamiento rápido	0,41	0,13
Zona de salida del flujo de aire	Diámetro (m)	Área transversal (m²)
Zona del aire caliente recuperado	0,45	0,16
Gases de combustión (chimenea)	0,68	0,36

Los resultados del cálculo del flujo volumétrico de cada zona del horno por donde ingresa o sale aire para ser parte del proceso y que forman parte del diagnóstico inicial del sistema se encuentran tabulados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados del cálculo del flujo volumétrico del aire al inicio del proyecto

Zona de entrada del flujo de aire	Flujo volumétrico (m³/s)
Aire de combustión	2,72
Zona de enfriamiento lento	4,01
Zona de enfriamiento intermedio	4,54
Zona de enfriamiento rápido	3,94
Zona de salida del flujo de aire	Flujo volumétrico (m³/s)
Zona del aire caliente recuperado	4,65
Gases de combustión (chimenea)	10,41

Para calcular el flujo másico del aire en cada puerto de muestreo colocado en las diferentes zonas del horno tipo túnel, se multiplicaron los flujos volumétricos obtenidos anteriormente por la densidad del aire a las condiciones de operación

del horno, por lo tanto se trabajó con una densidad promedio del $1,18 \text{ kg/m}^3$ que es la densidad del aire a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, obteniendo los flujos máscicos de cada zona del horno detallados en la Tabla 3.6 que permitieron más adelante realizar el balance de masa del sistema.

Tabla 3.6. Resultados del cálculo del flujo máscico del aire al inicio de l proyecto

Zona de entrada del flujo de aire	Flujo máscico (kg/s)
Aire de combustión	0,83
Zona de enfriamiento lento	5,58
Zona de enfriamiento intermedio	6,33
Zona de enfriamiento rápido	4,65
Zona de salida del flujo de aire	Flujo máscico (kg/s)
Zona del aire caliente recuperado	5,49
Gases de combustión (chimenea)	12,28

Estos resultados permitieron realizar el balance de masa del sistema, para lo cual se consideró la Figura 3.3.

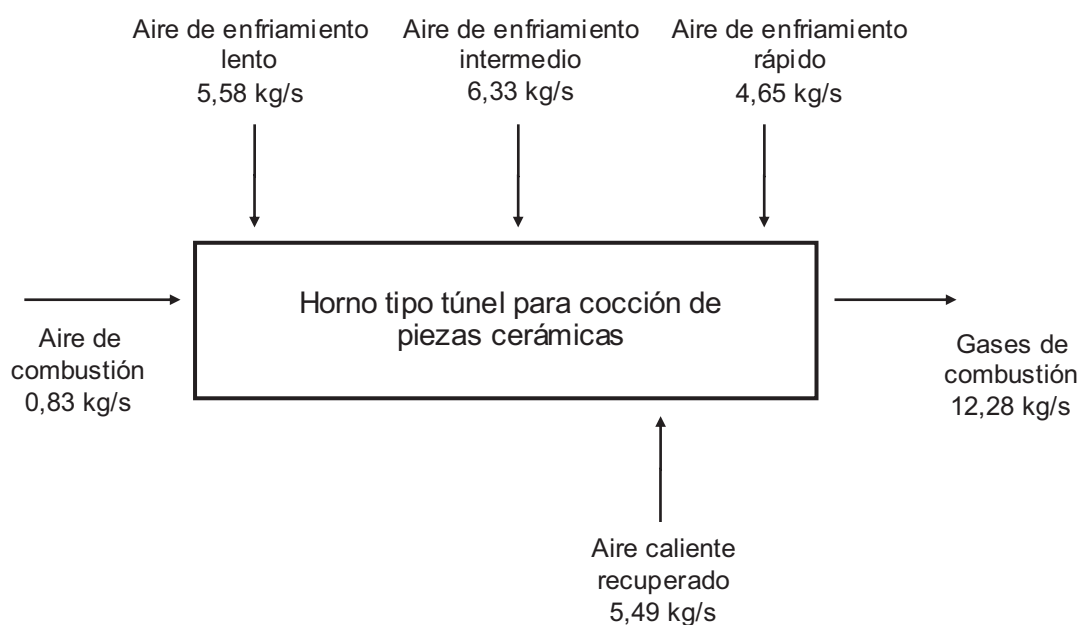


Figura 3.3. Balance de masa de las entradas y salidas de aire al horno de quema de cerámicos

En la Figura 3.3 descrita anteriormente se pueden observar representados los flujos de aire que ingresan al sistema para participar en la combustión, calentamiento y enfriamiento de las piezas y el aire que sale luego del proceso en función de la combustión que se produce, la cual se espera que sea completa o que se consuma la mayor cantidad de combustible para disminuir la concentración de gases contaminantes.

Este balance de masa permitió determinar el consumo real del aire que ingresaba para todo el proceso de combustión, calentamiento del aire y enfriamiento del aire al finalizar el proceso antes de que las piezas cerámicas salgan del horno, para lo cual se consideró la Figura 3.3 detallada anteriormente y se aplicó la Primera Ley de la Termodinámica, indicada en la Ecuación [3.2].

Por lo tanto, tendremos un flujo de 0,38 kg/s de aire consumido durante todo el proceso de calentamiento, cocción y enfriamiento de las piezas al inicio del proyecto.

$$\text{aire que ingresa} = \text{aire que sale} + \text{aire que se consume} \quad [3.2]$$

$$17,72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 17,39 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + \text{aire que se consume}$$

$$\text{aire que se consume} = 0,38 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

3.1.3 CONTROL DE LAS CONDICIONES DE INGRESO DE LOS FLUJOS AL QUEMADOR

Durante la toma de muestras de la caída de presión en las diferentes zonas del horno se realizaron también controles periódicos de la presión de entrada del aire y GLP en los quemadores para verificar que estas se mantengan constantes, para lo cual se trabaja con manómetros colocados a la entrada de cada quemador, como se observa en la Figura 3.4 de tal manera que se pueda nivelar el ingreso

de combustible dependiendo del flujo de aire que se requiera para una buena reacción.

Es importante medir continuamente el flujo de combustible que ingresa al sistema para alertar sobre cualquier desvío que pueda presentarse por desajuste de la calibración y que pueda afectar al proceso o a las piezas cerámicas que ingresan al sistema para su cocción.

Este procedimiento se lo realiza con ayuda de manómetros, los cuales deben ser verificados con regularidad para mantener un flujo constante de aire que ingresa y evitar saturar a la reacción y por consiguiente mantener regulada la emisión de gases contaminantes y aire en exceso.

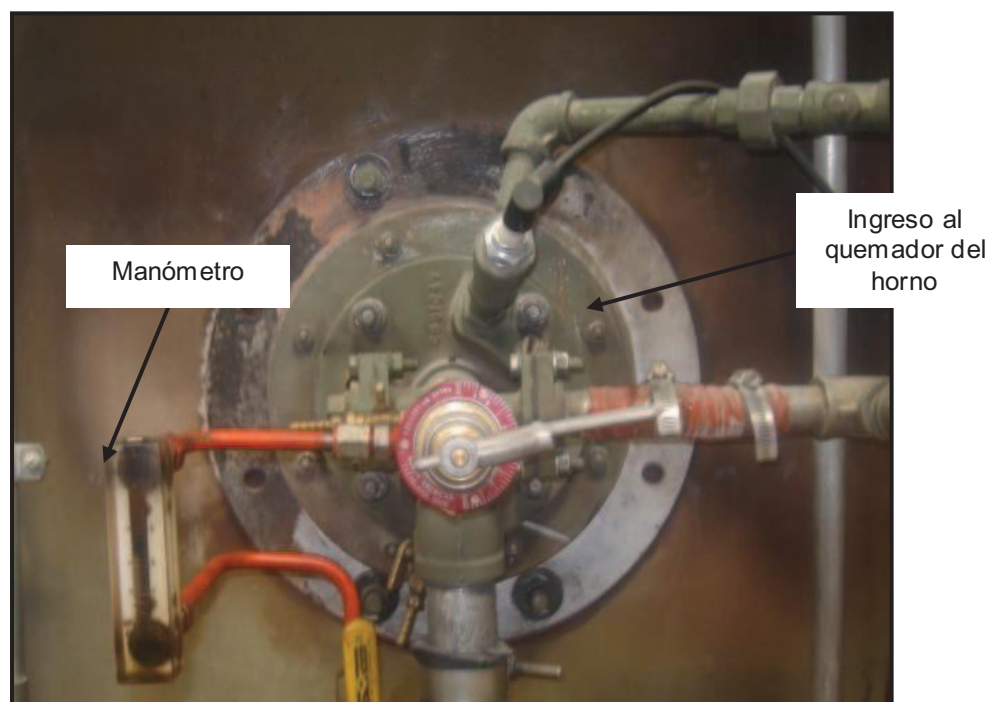


Figura 3.4. Manómetro de presión ubicado a la entrada del quemador

Posteriormente se realizó un análisis visual de la llama en un quemador piloto, que es un quemador que fue adecuado fuera del horno para realizar modificaciones de prueba y que representaba la acción de combustión de los demás quemadores que se encuentran dentro del horno de quema de cerámicos, el cual se encuentra representado en la Figura 3.5.

Este análisis se lo ejecutó como se explicó en el capítulo referente a Revisión Bibliográfica literal 1.3.1.2, Figura 1.16 con la finalidad de poder determinar como punto de partida a través de la observación si se estaba produciendo una buena combustión o si existía alguna deficiencia de uno de sus componentes al observar el tipo de llama que se estaba produciendo durante la combustión y su coloración.

Esto debido a que una llama pequeña o débil o una llama fuerte es considerada como un criterio de partida al momento de modificar los flujos de aire y GLP que ingresaban a la combustión, cuyos resultados se hayan agrupados en la Tabla 3.7.

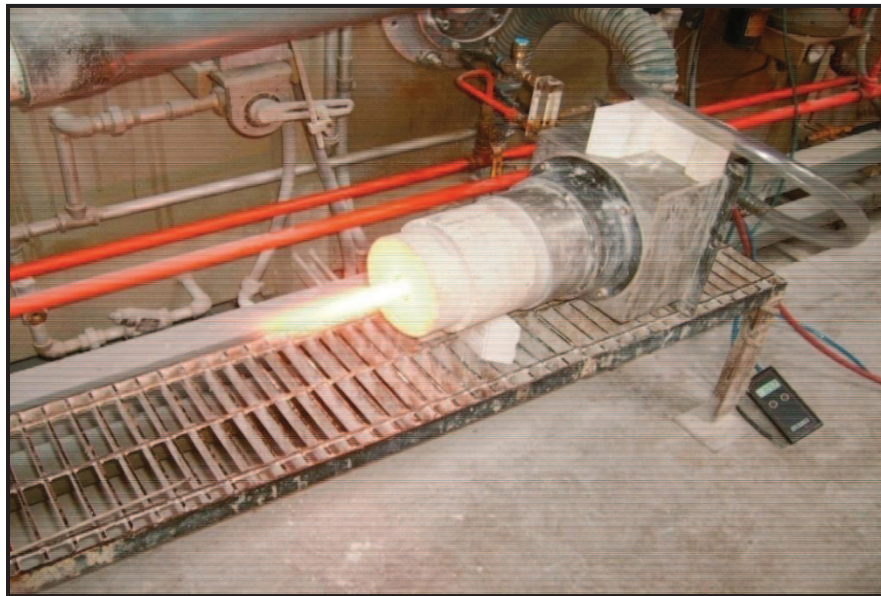


Figura 3.5. Análisis visual de la llama sin aislamiento

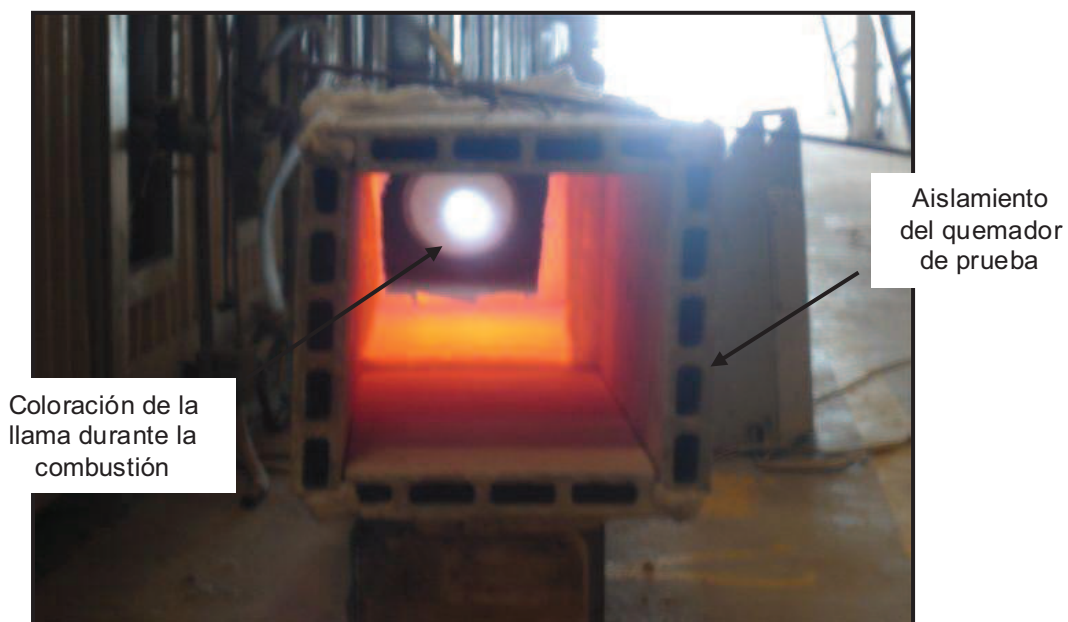
Así mismo, la observación de una llama demasiado fuerte o viva es considerada un indicador previo de que existe un exceso de componentes en la combustión y por lo tanto una mala combustión en el proceso.

Es por esta razón que en ambos casos si no se lleva un control visual como primer indicador de la eficiencia de la combustión se podrían generar mayor cantidad de gases contaminantes o la formación de hollín debido a una ineficiente reacción al momento de modificar los flujos de combustible y comburente que intervienen en la reacción de combustión.

Tabla 3.7. Resultados de la visualización de la llama del quemador de prueba

Observación	Condiciones de operación		Característica
Primera	Inicio de la determinación del estado inicial del horno	T = 123,8 °C	Llama de color ligeramente amarillento
		CO = 461 mg/Nm ³	
Segunda	Primera modificación de las condiciones de entrada de aire al quemador	T = 117,4 °C	Llama de color amarillo bien definido y un tenue color tomate en la base
		CO = 318,95 mg/Nm ³	
Tercera	Segunda modificación en las condiciones de entrada de aire al quemador	T = 108,4 °C	Llama de color celeste con un color amarillento en la base
		CO = 246,31 mg/Nm ³	
Cuarta	Tercera modificación de las condiciones de entrada de aire al quemador	T = 106,4 °C	Llama de color celeste intenso bien definido
		CO = 229,32 mg/Nm ³	

Por lo tanto, se concluyó de manera visual que la combustión se estaba realizando con exceso de oxígeno como se indica en la Figura 3.6, lo cual se comprobó con los cálculos desarrollados dentro del diagnóstico inicial del sistema.

**Figura 3.6.** Visualización de la coloración de la llama

Igualmente se mantuvo un monitoreo de la temperatura del flujo de aire que ingresaba a los quemadores y de los gases resultantes de la reacción para evitar

cambios que pudieran afectar a la cocción de las piezas, al medio ambiente por la variación de las condiciones de operación y al aporte energético para el funcionamiento del horno.

Esto debido a que si la temperatura del flujo de aire aumentaba de forma brusca, la eficiencia de la reacción de combustión dentro del quemador podía disminuir considerablemente y por lo tanto producir mayor cantidad de gases contaminantes a la atmósfera y altos excesos de oxígeno (García, 2001, pp. 42).

3.1.3.1 Cálculo de la relación aire/combustible

Para la calcular el consumo real de aire necesario para la combustión, se partió de la ecuación estequiométrica del combustible y se determinó la relación teórica aire/combustible, para lo cual se calculó primero la masa de aire y GLP contenidos en la reacción y que son requeridos teóricamente para una buena combustión (teóricamente combustión completa), como lo indica la Tabla 3.8 detallada a continuación:

Tabla 3.8. Cálculos de los pesos de los componentes de la ecuación estequiométrica de combustión

Compuesto	Kmol	Kg
O ₂	23	736
Aire	109,52	3 158,67
C ₃ H ₈	2	88
C ₄ H ₁₀	2	116
GLP	9,52	459,04

De los cálculos anteriores se pudo entonces determinar la relación estequiométrica aire/combustible la cual se indica a continuación:

$$r^{a/c} = \frac{3158,67 \text{ kg aire}}{459,04 \text{ kg GLP}} = 6,88 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg GLP}}$$

3.1.3.2 Cálculo del consumo teórico y real de aire para la combustión

Una vez calculada esta relación aire/combustible y utilizando los datos de la Tabla 3.9 donde se especifican las condiciones de operación de la fuente fija de combustión, se determinó el flujo másico real de aire consumido durante la reacción como lo indica su análisis.

Después de determinar el consumo teórico de aire necesario para la combustión en el horno de quema de cerámicos al inicio del proyecto y considerando que luego de haber realizado el balance de masa del sistema el consumo real de aire era de 1368 kg /h, se determinó que el índice de exceso de aire era igual a 1,55 lo cual confirma que existe una combustión completa del GLP con exceso de aire.

Tabla 3.9. Datos de la fuente fija de combustión (chimenea) en el horno de quema de cerámicos

FUENTE FIJA DE COMBUSTIÓN	HORNO TÚNEL 5
Combustible utilizado	GLP
Potencia del horno	961 HP
Consumo diario	118,18 kg/h
Horas de funcionamiento	24 h/día

(Edesa, 2010, p. 24)

$$118,18 \frac{kg \text{ GLP}}{h} \times 6,88 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ GLP}} = 813,08 \frac{kg \text{ aire}}{h}$$

Sin embargo el exceso de aire calculado que era el que ingresaba a la reacción era bastante alto, lo que se evidencia en la concentración de los componentes que forman parte del aire que sale por la chimenea.

Por lo tanto antes de realizar la modificación propuesta, se procedió a calibrar los flujos de aire y combustible que ingresan a los quemadores como medida

alternativa para mejorar el proceso de combustión y la eficiencia energética del mismo.

3.1.4 CALIBRACIÓN DE LOS FLUJOS DE AIRE Y GLP QUE INGRESAN A LOS QUEMADORES

La relación aire/combustible teórica es importante ya que si el flujo del aire que ingresa a los quemadores varía, es necesario modificar también el flujo de GLP que forma parte de la combustión, por lo tanto es necesario mantener esta relación constante durante las modificaciones o calibraciones de los flujos de aire y combustible que ingresen a los quemadores.

Debido a esto, se realizaron modificaciones nivelando las caídas de presión del flujo de aire que ingresaba a los quemadores, procurando mantener al mismo tiempo un equilibrio con el flujo de GLP que ingresaba a la combustión como se puede observar en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Datos experimentales de la modificación de los flujos de aire y GLP que ingresaban a los quemadores para su combustión

Nº medida	AIRE in H2O	GLP in H2O
1	1,93	1,88
2	1,85	1,82
3	1,79	1,77
4	1,69	1,66
5	1,35	1,32
6	1,29	1,24
7	1,25	1,20
8	1,23	1,19
9	1,21	1,17

Estas calibraciones se realizaron ajustando el flujo de aire que ingresaba a los

quemadores en función de la presión de ingreso del flujo de GLP utilizado para la reacción de combustión y su control se lo realizaba mediante un manómetro colocado en la parte exterior de cada quemador como lo indica la Figura 3.7 indicada a continuación; adicionalmente, para mantener una buena combustión dentro del horno, fue importante también llevar un control constante del flujo de los gases de la chimenea a través del aire de combustión y de la eficiencia de la misma.



Figura 3.7. Manómetro ubicado a la entrada del quemador

Por esta razón, mientras se modificaban los flujos de aire y GLP en los quemadores, se tomaron muestras de los gases de combustión con el equipo de monitoreo y se llevó un control de la eficiencia de la combustión y del exceso de aire utilizado para mantener una combustión completa. Como se puede observar en la Tabla 3.11 el exceso de aire fue determinado por lo tanto en función del porcentaje de oxígeno en exceso producido por la combustión del aire real que ingresa a los quemadores para la reacción mediante la ecuación [2.4] definida en

el capítulo de Metodología, literal 2.1.5.

Tabla 3.11. Datos obtenidos del monitoreo en la chimenea a condiciones iniciales y durante la calibración de los quemadores

N ° Medida	Temperatura (°C)	Oxígeno (%)	Exceso de aire (%)
1	113,8	16,76	114,33
2	112,3	16,71	114,56
3	113,6	16,82	115,02
4	112,9	16,73	115,23
5	113,7	16,62	115,97
6	111,8	16,23	116,62
7	111,2	16,11	116,76
8	111,6	15,97	115,72
9	113,1	15,84	114,8
10	108,5	15,72	115,64
11	109,6	15,65	116,71
12	110,3	16,54	116,63
13	112,5	15,56	115,65
14	111,2	15,02	116,82
15	109,3	14,91	116,11

Estas modificaciones permitieron determinar las condiciones a las cuales ya la combustión producía una cantidad de contaminantes aproximadamente constante como es el caso de la concentración del monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) como se puede observar en la Figura 3.8y Figura 3.9 debido a que el flujo de aire que ingresaba a la combustión salía como parte de los gases por la

chimenea luego de haber consumido todo el GLP que le correspondía.

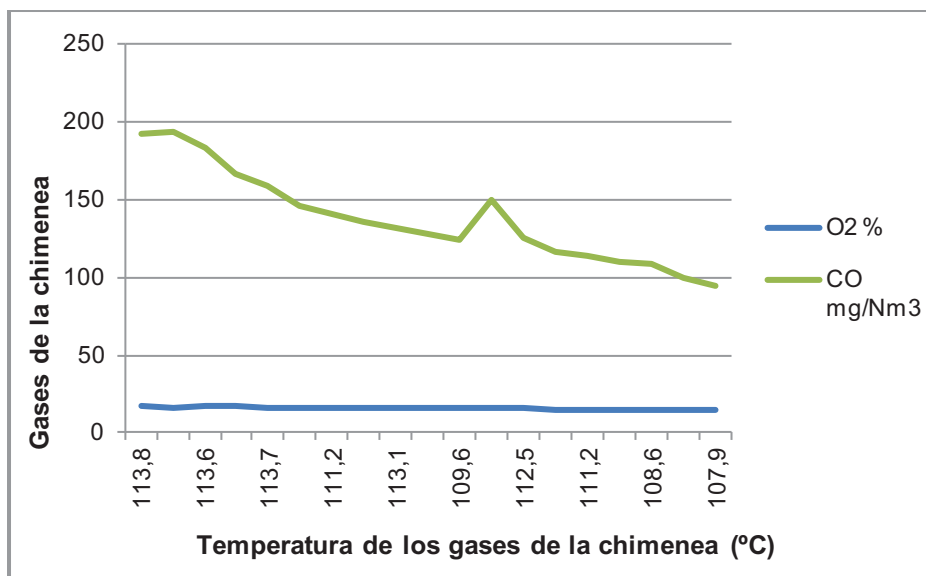


Figura 3.8. Concentración del CO que forma parte del gas de combustión

En la Figura 3.8 se puede observar como la influencia de la modificación del flujo de aire que ingresa a la combustión afecta en la concentración del CO, mayor contaminante dentro de los gases de combustión, mientras que en la Figura 3.9 el porcentaje de CO₂ se mantiene prácticamente constante debido a que este último es parte del producto de la reacción.

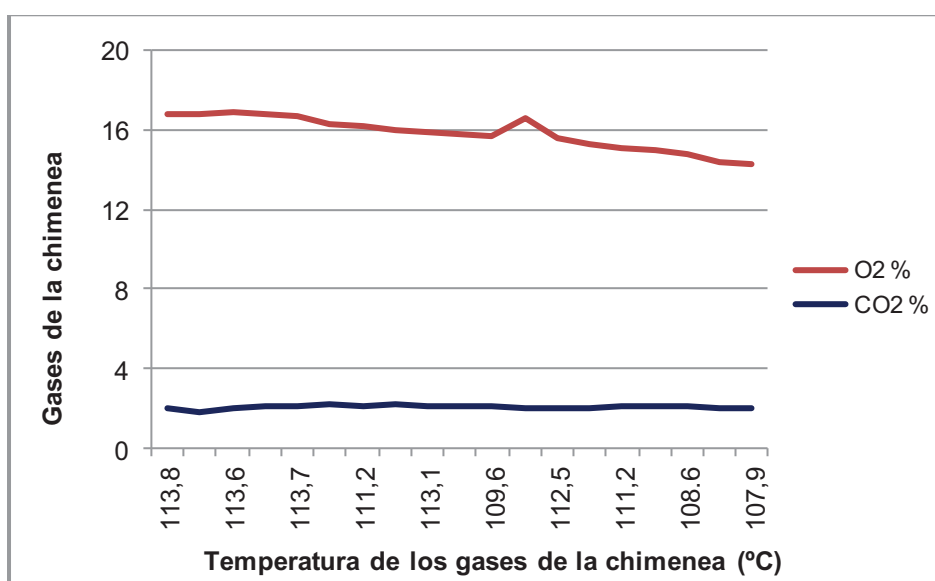


Figura 3.9. Concentración del CO₂ que forma parte del gas de combustión

3.1.5 RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA EN EL HORNO DE QUEMA DE CERÁMICOS

La determinación del balance de energía del sistema, el horno de quema de cerámicos, permitió tener la información necesaria para analizar la transformación de la energía química del combustible en el calor que se utiliza para calentar las piezas en su interior. Dicha información fue utilizada para analizar y optimizar el uso de energía además de economizar recursos para lo cual se consideraron todos los elementos que de alguna forma pueden ganar o perder calor a través del proceso de cocción de las piezas cerámicas en el horno tipo túnel y al calor total requerido como la sumatoria de los calores generados por los gases de combustión, tomando además en cuenta el producto por las pérdidas térmicas al ambiente.

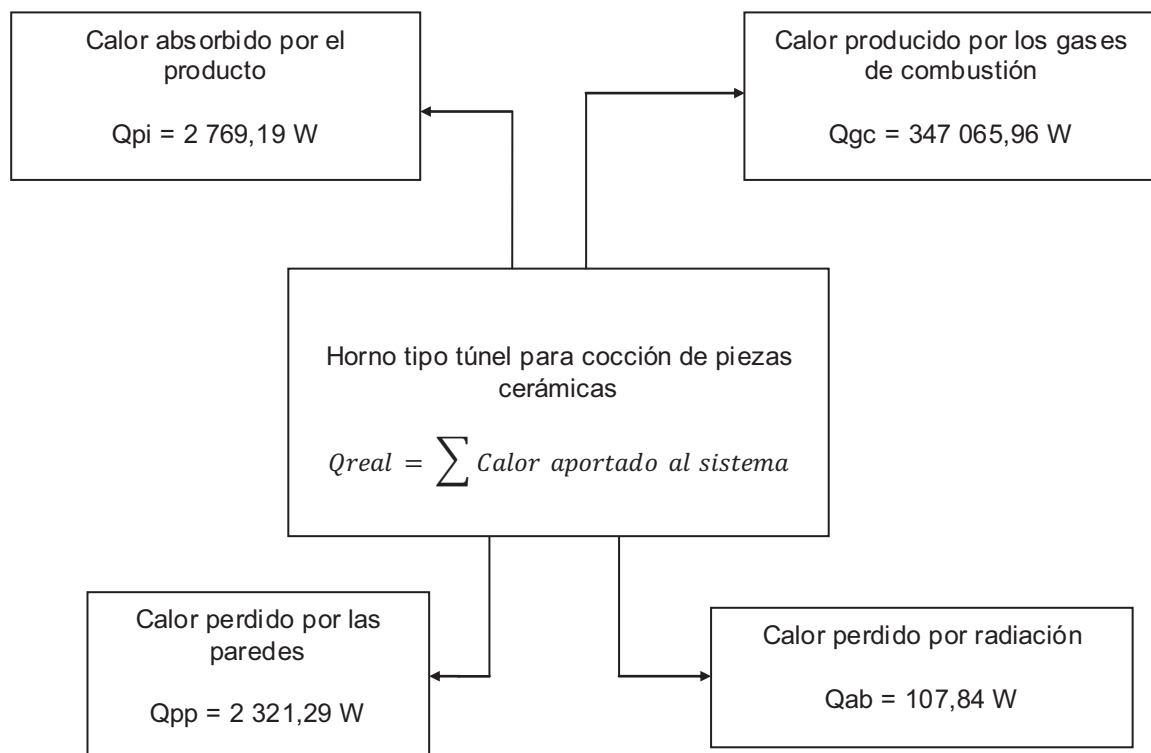


Figura 3.10. Balance de energía en el horno de quema de cerámicos

Es por esta razón que una vez realizado el balance de masa del sistema, se procedió a realizar el balance energético del mismo como se indica en la Figura 3.10 indicada anteriormente.

Este balance se encuentra además analizado en el capítulo de Metodología, literal 2.2.3 donde se describe también de forma matemática cada tipo de energía que se encuentra aportando al sistema.

3.1.5.1 Calor absorbido por el producto

Para determinar la cantidad de calor absorbido por las piezas cerámicas durante el tiempo que permanecen dentro del horno, se consideraron las condiciones a las que se realiza la cocción de las mismas, por lo tanto, fue necesaria la determinación del área bajo la curva de la Figura 3.11, donde se detallan las diferentes temperaturas a las que se encuentra el horno a lo largo de las diferentes zonas que lo conforman medidas con termocupas instaladas en el interior del horno.

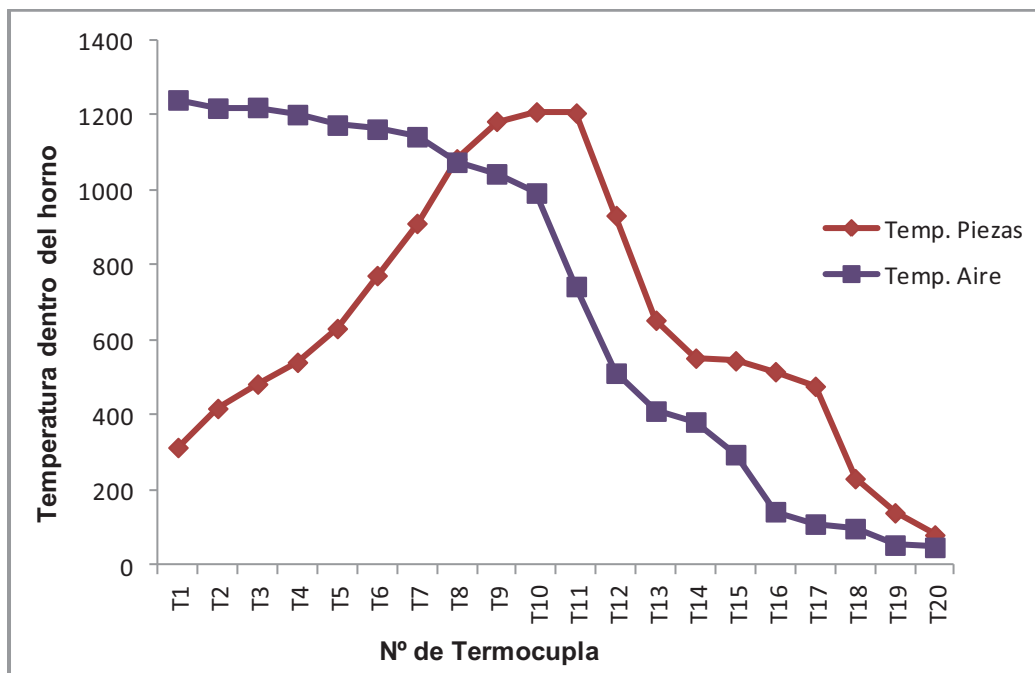


Figura 3.11. Variaciones de temperatura dentro del horno de quema de cerámicos (Bitácora del horno 5, EDESA, 2012)

Esta área por lo tanto se calculó considerando cada intervalo de temperatura que forma parte de la curva mediante una integral de primer orden que permitió conocer que el área final era de 47 °C.

Además para la determinación del calor absorbido por el producto fue necesaria la utilización de la Tabla 3.12 donde se identifican las condiciones de las piezas cerámicas que ingresan al horno.

Tabla 3.12. Propiedades de las piezas cerámicas que ingresan al horno por carga

Propiedad	Valor	Unidades
C _{pi}	0,88	kJ/kg*°C
M _{pi}	241,29	kg/h
T _i	45	°C
T _m	1 208	°C

(Edesa, 2010)

Por lo tanto:

$$Q_{pi} = 241,29 \frac{kg}{h} \times \frac{0,88 kJ}{kg \times ^\circ C} \times 47 ^\circ C \times \frac{1\ 000 W \times s}{kJ} \times \frac{h}{3\ 600 s}$$

$$Q_{pi} = 2\ 769,19 W$$

3.1.5.2 Calor perdido hacia el ambiente

Para la determinación del calor perdido por las paredes del horno se calculó en primer lugar el factor de forma, considerando el área superficial interna de 1,91 m² y la longitud del horno de 52,8 m, datos proporcionados en las características de diseño del horno en el capítulo de Revisión Bibliográfica, literal 1.4.2; por lo tanto, el valor del factor de forma fue de 65,62 m.

Posteriormente se realizó el cálculo del calor utilizando para el efecto los datos experimentales de las propiedades internas y externas del horno, para lo cual se realizó un promedio de la temperatura en diferentes puntos aleatorios del horno para determinar la temperatura de las paredes externas como se indica en la Tabla 3.13 y en el caso de las paredes internas se analizó con un promedio de las

condiciones a las que debe mantenerse de acuerdo a los datos proporcionados por las termocupas ubicadas en el interior del mismo.

Tabla 3.13. Datos experimentales de las condiciones de las paredes del horno

N° medida	To (°C)	Ti (°C)
1	741,5	34
2	753,8	314
3	738,9	418
4	713,5	541
5	722,4	631
6	743,6	772
7	751,8	911
8	712,4	1083
9	717,5	1183
10	739,4	1208
11	747,1	1205
12	712,8	932
13	715,9	653
14	734,8	552

Además, considerando que las paredes del horno fueron construidas de ladrillo refractario para la determinación del valor de la conductividad térmica se trabajó con un valor de 1,63 kJ/m*°C*h.

Por lo tanto:

$$Q_{pp} = 1,63 \frac{kJ}{m \times ^\circ C \times h} \times 65,62m \times (729,77 - 621,35)^\circ C$$

$$Q_{pp} = 11\,596,67 \frac{kJ}{h} \times \frac{1\,000\,W \times s}{kJ} \times \frac{h}{3600\,s}$$

$$Q_{pp} = 3\,221,29\,W$$

3.1.5.3 Calor perdido por radiación

Para el análisis del calor perdido por las aberturas del horno de quema de cerámicos, se consideró a la chimenea como un área de escape de calor por donde salen los gases de combustión conjuntamente con los gases propios de la reacción.

Es por esta razón que se analizó al horno de quema de cerámicos como un solo sistema donde se produce una transferencia de calor por radiación y por lo tanto se tiene una emisividad de las paredes de 0,75 al estar construido de ladrillo refractario con un área total de la chimenea de 12,9 m² y se lo estudió también tomando como referencia las propiedades de los gases de combustión producto de la reacción, las cuales se encuentran especificadas en la Tabla 3.14 indicada a continuación:

Tabla 3.14. Propiedades de los gases de combustión

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
T_G	112,9	°C
T_∞	38	°C
ε	0,75	-
σ	$4,88 \times 10^{-8}$	kcal/m ² x h x °C ⁴

Por lo tanto:

$$Q_{ab} = 4,88 E^{-8} \frac{kcal}{m^2 \times h \times ^\circ C^4} \times 0,75 \times 12,9 m^2 \times (112,9^4 - 38^4) ^\circ C^4$$

$$Q_{ab} = 76,72 \frac{kcal}{h} \times 1,16 \frac{W \times h}{kcal}$$

$$Q_{ab} = 107,84 W$$

3.1.5.4 Calor transportado por los gases de combustión

Para la determinación del calor producido por los gases de combustión, se utilizó el flujo másico del aire determinado en la chimenea y la información proporcionada de los monitoreos durante la calibración de los quemadores al inicio del estudio, calculando primero el calor específico de los gases de combustión mediante el análisis de su composición según la Ecuación [3.3] y la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Valores de calor específico de los gases de combustión a 112,9 °C

PROPIEDAD	(kJ/kg*°C)
$C_{p_{O_2}}$	0,92
$C_{p_{CO_2}}$	0,79
$C_{p_{N_2}}$	1,04

(Perry et al., 2001, pp. 365)

Por lo tanto:

$$C_{p_{gc}} = C_{p_{O_2}} \times \%O_2 + C_{p_{CO_2}} \times \%CO_2 + C_{p_{N_2}} \times \%N_2 \quad [3.3]$$

$$C_{p_{gc}} = 0,92 \times 0,1781 + 0,79 \times 0,0209 + 1,04 \times 0,801$$

$$C_{p_{gc}} = 1,013 \frac{kJ}{kg \times ^\circ C}$$

Una vez determinado el calor específico de los gases de combustión, se calculó el calor generado considerando los 12,28 kg/s de aire que salen por la chimenea; este calor generado por los gases de combustión bastante alto, pero a medida que se vayan realizando las modificaciones para disminuir el consumo de combustible una vez finalizado el diagnóstico inicial del sistema se espera que este consumo energético también disminuya.

$$Q_{gc} = 12,28 \frac{kg}{s} \times 1,013 \frac{kJ}{kg \times ^\circ C} \times (112,9 - 85)^\circ C \times \frac{1\,000\, W \times s}{kJ}$$

$$Q_{gc} = 347\,065,96\, W$$

3.1.5.5 Cálculo de la eficiencia de la combustión

Tabla 3.16. Resultados de los calores generados y absorbidos durante el proceso de combustión en el horno de quema de cerámicos

Calor generado	Valor (W)
Q _{pi}	2 769,19
Q _{pp}	3 221,29
Q _{ab}	107,84
Q _{gc}	347 065,96

Para determinar la eficiencia de la combustión fue necesario conocer el calor total utilizado durante todo el proceso de calentamiento, cocción y enfriamiento de las piezas cerámicas dentro del horno, para lo cual se realizó la sumatoria de todos los calores que aportan al proceso y que se encuentran en la Tabla 3.16 y se obtuvo un calor total de 353,16 kW.

Considerando para el cálculo del calor teórico necesario para una buena combustión el poder calorífico superior del GLP que es 50 065 kJ/kg y los 118,18 kg/h de GLP que ingresa al horno, se determinó que el calor requerido para la combustión del GLP era de 1 643,52 kW y en función de esto se calculó la eficiencia del proceso tomando en consideración el calor real que se consume que fue de 353,16 kW como se determinó anteriormente, por lo tanto, como parte del diagnóstico inicial de operación del horno, se puede concluir que la eficiencia del proceso era de 21,49% a partir del cual se adecuó la resistencia eléctrica para analizar si es factible el mejoramiento de esta eficiencia con un ahorro energético considerable.

3.2 RESULTADOS DE LAS CONDICIONES TÉCNICAS NECESARIAS PARA MEJORAR LA OPERACIÓN DEL HORNO

Una de las opciones para aprovechar el calor generado e incrementar la eficiencia de la conversión de energía es el precalentamiento del aire de combustión, debido a que el aire caliente aumenta la velocidad de reacción, lo que tiene como efecto inmediato un acortamiento de la llama además de ser una alternativa para reducir el exceso de aire, mejorar la composición de los gases de combustión y disminuir la energía necesaria para realizar el proceso.

3.2.1 MEDIDAS ALTERNATIVAS PARA EL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE QUE INGRESA A LOS QUEMADORES

Como parte del proyecto de titulación y como alternativa para precalentar el aire que ingresa a los quemadores, se adecuó una resistencia eléctrica a la entrada del quemador de prueba del horno como se puede observar en la Figura 3.12.

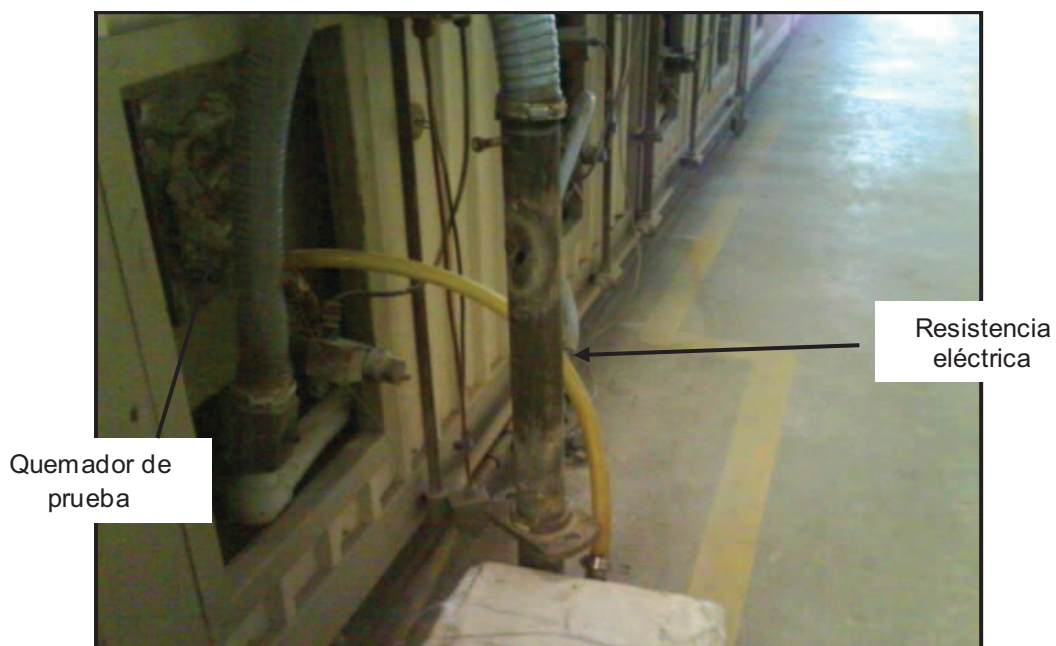


Figura 3.12. Adecuación de niquelina al quemador de prueba

La resistencia eléctrica utilizada fue una niquelina, cuyo objetivo fue de transformar la energía eléctrica en calor, ya que al ser un material conductor, ofrece resistencia al pasaje de corriente.

Esto permitió precalentar el aire que ingresaba al quemador y con esta modificación se realizó nuevamente el análisis de los flujos de GLP, aire y emisión de los gases contaminantes para determinar si era factible la disminución de la cantidad del combustible que ingresaba al horno con la consecuente disminución de gases de combustión y menor consumo energético del horno.

3.2.2 RESULTADOS DEL CALOR GENERADO POR LA INSTALACIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

Para la determinación de la potencia de la niquelina, se utilizó una pinza amperimétrica conectada al quemador como se puede apreciar en la Figura 3.13, la cual permitía conocer la variación de la corriente de la niquelina mientras se nivelaba el ingreso de aire al quemador.



Figura 3.13. Pinza amperimétrica conectada a la entrada del quemador

El valor de la resistencia del material conductor se determinó aplicando la Ley de Ohm, la misma que explica que la resistencia es directamente proporcional a su longitud o extensión e inversamente proporcional a la superficie de su sección normal, siendo la constante de proporcionalidad una magnitud que va a depender del material conductor o también conocida como el coeficiente de resistividad que es propio de cada sustancia o material y a que depende de sus propiedades internas, por lo tanto se trabajó con la Tabla 3.17 donde se han registrado algunos de los coeficientes más utilizados en la industria para sólidos que se encuentran a 25 °C.

Tabla 3.17. Coeficientes de resistividad de algunos sólidos a 25° C

Material	ρ ($\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$)
Aluminio	0,026
Carbón	100 ~ 1 000
Hierro	0,10 ~ 0,14
Bronce	0,13 ~ 0,29
Oro	0,02
Niquelina	0,44
Nichrom	1,10

(Perry et al., 2001, pp. 613)

La resistencia del conductor considerando que el área transversal de la resistencia eléctrica (la niquelina) era de 3 966,26 mm² fue 2,77 x 10⁻⁵Ω y una vez determinado el valor de la resistencia eléctrica se procedió al análisis de la transformación de energía que se produjo en el sistema utilizando la Ley de Joule, por lo tanto, la potencia que la niquelina aportó a la reacción de combustión fue de 33,90 kW.

Esta potencia determinada para el funcionamiento de la niquelina en el quemador de prueba se proyectó a los 28 quemadores que funcionan dentro del horno tipo túnel, obteniendo de esta manera un requerimiento de 949,31 kW, el cual fue

añadido en la sumatoria del calor requerido para el funcionamiento del horno luego de modificar las condiciones de operación para determinar su incidencia en el ahorro energético que se esperaba al final el proyecto.

3.3 DIAGNÓSTICO FINAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO

Luego de haber colocado la resistencia eléctrica a la entrada del quemador para poder precalentar el aire de combustión, se procedió a realizar nuevamente modificaciones en los flujos de entrada de aire y combustible al quemador que permitieron determinar las condiciones finales de operación del horno tipo túnel y la eficiencia de la combustión. Por esta razón se adaptaron mangueras a la entrada del combustible y del aire al quemador de análisis como se observa en la Figura 3.14 con el fin de simular el proceso de combustión que tenía lugar dentro del horno de quema de cerámicos.

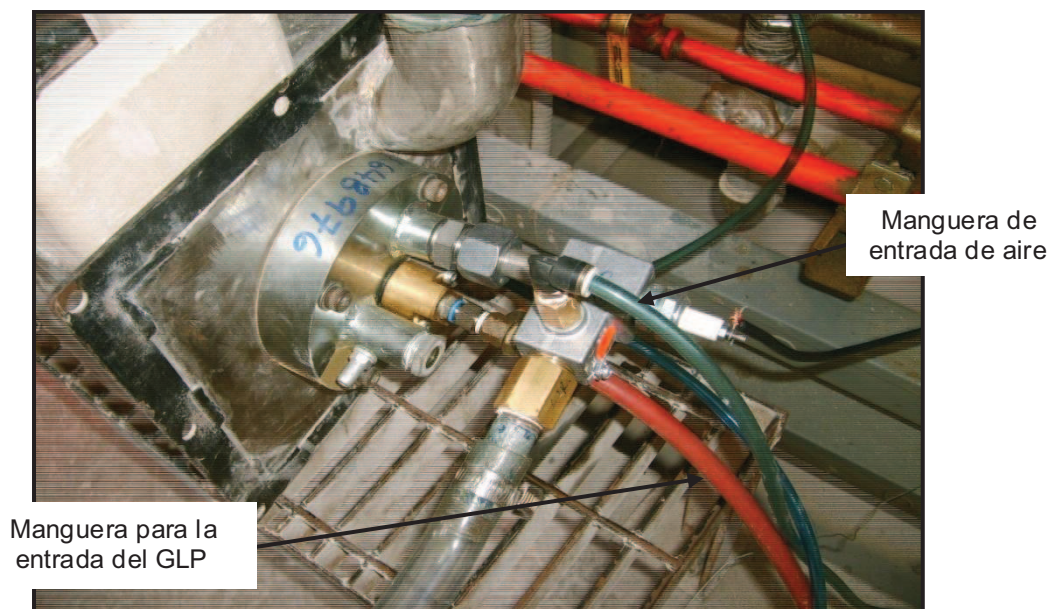


Figura 3.14. Mangueras para la entrada de aire y de combustible al quemador

Para llevar un control de estas modificaciones realizadas nuevamente se tomaron datos de la caída de presión en cada zona de entrada y salida de aire al horno y

de la concentración de contaminantes generados por la combustión, donde se consideró la concentración del CO como un indicador de la disminución o aumento de los gases de combustión por ser el principal componente nocivo producido por una combustión incompleta.

Esta reducción se realizó hasta lograr una concentración de CO constante, ya que poca cantidad de los elementos necesarios para la combustión también podría producir mayor porcentaje de inquemados y afectar a la producción; en la Figura 3.15 se puede apreciar de mejor manera la disminución de la formación de CO que como se explicó anteriormente, es directamente proporcional a la disminución del aire de combustión que ingresaba a los quemadores.

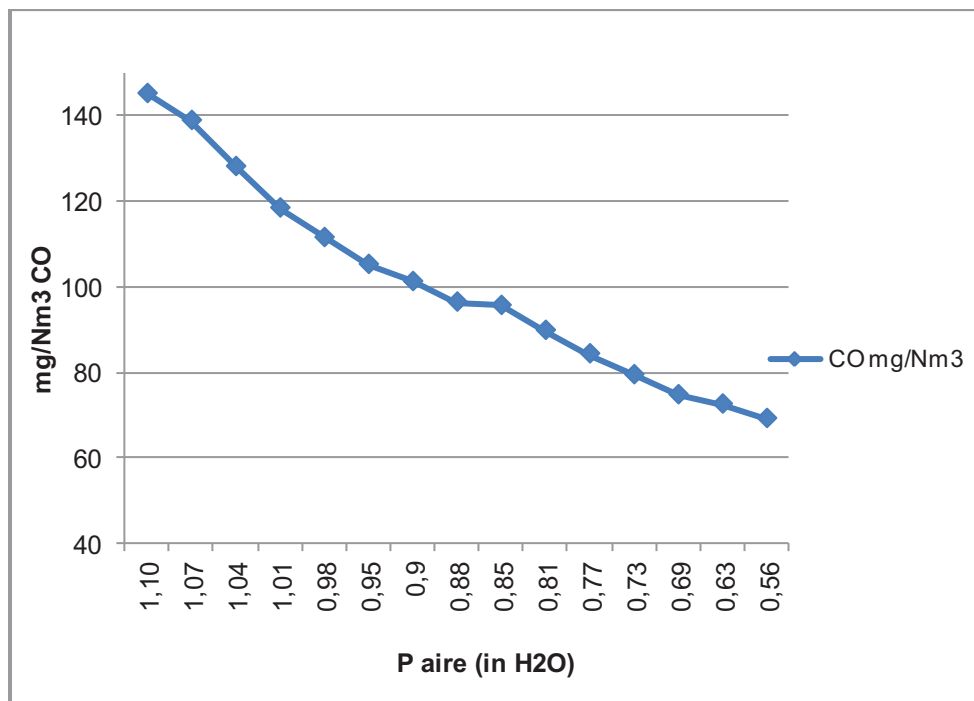


Figura 3.15. Concentración de CO con relación a la presión del aire que ingresa al quemador luego de las modificaciones

Estas modificaciones se realizaron hasta lograr una eficiencia en la combustión aproximadamente constante de 78,35% y una disminución en la producción de los gases de combustión; en el caso de la generación CO por ejemplo, se logró disminuir su concentración de 77 ppm (138,77 mg/Nm³) a 61 ppm (64,40 mg/Nm³) a una temperatura de 109,3 °C medidos a la salida de la chimenea, con lo cual se

logró además cumplir con los parámetros establecidos por la legislación ambiental, que estipula que la concentración máxima de CO para fuentes fijas es de 100 mg/Nm^3 . Es importante mencionar también que una mala combustión no solo se evidencia en la producción de los gases que resultan de la reacción y que salen por la chimenea, sino que también afecta al proceso de cocción de las piezas cerámicas.

Debido a esto es necesario llevar siempre un control visual del estado en el que ingresan las piezas al horno y al salir, revisar que no presenten zonas crudas o zonas con burbujas o quebradas debido a una mala reacción, ya sea por el ingreso de aire o combustible en exceso produciendo reactivos sin quemarse, o por una deficiencia de ellos produciendo una combustión pobre y con gran cantidad de hollín o cenizas.

Es por esta razón que además del control del flujo de aire y combustible que ingresaban a los quemadores, fue muy importante realizar inspecciones visuales de las piezas antes de ingresar al horno y una vez finalizada su cocción como se puede apreciar en las Figura 3.16.



Figura 3.16. Salida de las piezas del horno cerámico

Al mismo tiempo que se modificaron los flujos de aire y combustible que ingresaban a los quemadores, se realizaron las mediciones de las presiones de velocidad, temperatura y humedad nuevamente para determinar la velocidad promedio en cada ducto luego de las modificaciones y posteriormente se realizó el balance de masa y energía final.

3.3.1 NUEVAS CONDICIONES DE VELOCIDAD EN CADA ZONA DE AIRE

Se tomaron los datos de la composición de los gases de la chimenea que fueron obtenidos durante las modificaciones, los cuales se tabularon en la Tabla 3.18 y luego se calculó la masa del gas de chimenea que fue de 29,09 kg/kg mol de aire que ingresaba a los quemadores luego de implementada la niquelina para precalentar el aire que formaba parte de la reacción de combustión.

Tabla 3.18. Composición de los gases de combustión luego de las modificaciones

Nº de medida	T (°C)	O ₂ %	CO ppm	CO mg/Nm ³	CO ₂ %	N ₂ %
1	118,7	17,92	76	145,06	2,20	79,87
2	118,3	17,40	77	138,77	2,36	80,23
3	120,8	17,25	84	128,00	2,46	80,28
4	118,7	17,20	64	118,31	2,49	80,30
5	116,6	17,17	69	111,40	2,51	80,31
6	121,8	17,36	72	105,12	2,41	80,31
7	120,2	17,19	73	101,11	2,50	80,30
8	120,1	17,34	65	96,32	2,40	80,25
9	118,6	17,01	69	95,53	2,87	80,11
10	118,2	17,39	67	89,70	2,24	80,36
11	118,6	17,42	66	84,23	2,31	80,11
12	118,4	17,25	64	79,34	2,17	80,45
13	118,1	17,33	63	74,66	2,19	80,37
14	117,7	17,21	61	72,49	2,35	80,41
15	177,7	17,17	63	69,11	2,71	80,10

Tabla 3.18. Composición de los gases de combustión luego de las modificaciones
(continuación...)

16	117,5	17,15	61	64,42	2,51	80,33
17	116,8	17,69	64	72,57	2,77	80,14
18	117,1	17,57	62	69,42	2,78	80,35
19	116,3	17,66	62	71,83	2,71	80,24
20	117,9	17,43	64	70,26	2,74	80,54

Posteriormente se realizó el cálculo del peso molecular del aire seco a las nuevas condiciones de operación una vez implementada la resistencia eléctrica, obteniéndose como resultado 28,63 kg/kg mol de aire seco que ingresaba a los quemadores para participar en el proceso de combustión.

Con estos datos se realizó el cálculo de la velocidad en cada ducto de entrada y salida de aire bajo las mismas condiciones a las cuales se analizó la velocidad en el diagnóstico del proyecto, obteniendo los resultados indicados en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Resultados obtenidos del cálculo de la velocidad del aire a condiciones finales

Zona de entrada del flujo de aire	Velocidad del gas (m/s)
Aire de combustión	29,55
Zona de enfriamiento lento	29,82
Zona de enfriamiento intermedio	29,58
Zona de enfriamiento rápido	29,62
Zona de salida del flujo de aire	Velocidad del gas (m/s)
Zona del aire caliente recuperado	27,53
Gases de combustión (chimenea)	28,76

3.3.2 FLUJO VOLUMÉTRICO A LAS CONDICIONES FINALES

Para el cálculo del flujo volumétrico del aire que ingresaba y salía del horno

durante la combustión para la cocción de las piezas cerámicas, se utilizó nuevamente la Tabla 3.4 de la página 72 del capítulo de resultados y discusión de resultados, en la cual se detallan las dimensiones y las áreas transversales de cada zona de aire que participan en el proceso.

Dichas áreas fueron multiplicadas por el flujo volumétrico determinado anteriormente, obteniéndose los resultados detallados en la Tabla 3.20, que permitieron determinar el flujo volumétrico del aire utilizado durante todo el proceso de combustión luego de precalentar el aire que ingresaba a los quemadores.

Tabla 3.20. Resultados obtenidos del cálculo del flujo volumétrico del aire luego de precalentar el aire que ingresa a los quemadores

Zona de entrada del flujo de aire	Flujo volumétrico (m³/s)
Aire de combustión	2,66
Zona de enfriamiento lento	3,88
Zona de enfriamiento intermedio	4,44
Zona de enfriamiento rápido	3,85
Zona de salida del flujo de aire	Flujo volumétrico (m³/s)
Zona del aire caliente recuperado	4,40
Gases de combustión (chimenea)	10,35

Estos resultados fueron multiplicados por la densidad del aire a las condiciones de operación (1 atm y 25 °C) y se obtuvieron los resultados representados en la Tabla 3.21, con los cuales procedió a realizar el balance del flujo másico final del sistema para determinar la cantidad real del aire que se consumía durante el proceso de combustión, calentamiento y enfriamiento de las zonas del horno de quema de cerámicos considerando la relación que establece que el aire que ingresa debe ser igual al aire que se consume sumado al aire que sale del proceso.

Tabla 3.21. Flujo másico del aire en los ductos de entrada y salida luego de las modificaciones

Zona de entrada del flujo de aire	Flujo másico (kg/s)
Aire de combustión	3,46
Zona de enfriamiento lento	4,58
Zona de enfriamiento intermedio	5,24
Zona de enfriamiento rápido	4,54
Zona de salida del flujo de aire	Flujo másico (kg/s)
Zona del aire caliente recuperado	5,19
Gases de combustión (chimenea)	12,21

Por lo tanto tenemos un flujo de aire de 0,42 kg/s que se consumía durante el proceso de combustión si se lo precalentaba antes de ingresar a la cámara u hogar para formar parte de la reacción, pudiendo concluir además que las modificaciones del flujo variando la temperatura del aire que ingresaba a los quemadores permitieron mejorar la mezcla de los componentes que forman parte de la combustión y por lo tanto se logró una superior combustión durante el proceso.

3.3.3 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE AIRE EN EL PROCESO

La cantidad de aire teórico necesario para que se realice la combustión de acuerdo a la relación estequiométrica aire/combustible se mantiene constante ya que depende de la estequiometría de la ecuación del combustible con un valor de 813,08 kg/h, mientras que del balance de masa de los flujos de aire que ingresa y sale del proceso se determinó finalmente un consumo de 1512 kg aire/h.

Por lo tanto, la eficiencia de la reacción en los quemadores mejoró de 78,35 % a

85,96 % permitiendo concluir que el precalentamiento del aire que ingresa a los quemadores para el proceso de combustión mejoró la mezcla y reacción del aire con el combustible.

En la Tabla 3.22 que se detalla a continuación, se puede observar el incremento en la eficiencia de la reacción de combustión y la cantidad de aire que se consumió al inicio del proyecto y luego de haber colocado la resistencia eléctrica en el quemador para el precalentamiento del aire.

Tabla 3.22. Resultados de la eficiencia de la reacción al inicio del proyecto y luego de la implementación de la niquelina al quemador

Estado del estudio	η reacción (%)	Aire consumido (kg/h)
Al inicio	78,35	1368
Luego de precalentar el aire al quemador	85,96	1512

El cálculo de la eficiencia de la reacción se lo realizó considerando efecto el aire consumido durante la combustión en función del aire teórico requerido de acuerdo a la estequiometría de la reacción, como se indica en la Ecuación [3.4]:

$$\eta_{reacción} = \frac{Ma'}{Ma} \times 100 \quad [3.4]$$

Donde:

Ma' : cantidad de aire práctico para la combustión (kg/h)

Ma : cantidad de aire estequiométrico (kg/h)

3.3.4 RESULTADOS DEL MONITOREO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Para mantener un flujo de aire por la chimenea que permita tener concentraciones

bajas de contaminantes a la atmósfera, se realizó también el monitoreo de los gases de combustión generados al precalentar el aire que ingresaba a los quemadores en el transcurso de las calibraciones.

Bajo estas nuevas condiciones se obtuvieron los resultados que se pueden apreciar en la Tabla 3.23, donde se puede observar el aumento en la temperatura de salida de los gases de 112,9 °C en promedio a 118,7 °C lo que a su vez produjo la disminución en el porcentaje de oxígeno que formaba parte del producto de 18,56 % a un valor de 15,67% logrando de esta manera una mejor eficiencia en la combustión.

Tabla 3.23. Datos obtenidos del monitoreo en la chimenea a condiciones finales y durante la calibración de los quemadores

Medida	Temperatura (°C)	Oxígeno (%)	Exceso de aire (%)
1	112,9	18,56	115,67
2	112,3	18,02	115,71
3	112,9	17,57	116,65
4	113,8	17,16	116,71
5	114,7	17,12	116,64
6	114,6	16,80	116,8
7	115,8	16,64	117,12
8	116,6	16,63	117,22
9	117,1	16,65	117,57
10	117,7	15,71	118,02
11	118,7	15,67	118,56

De igual forma se pudo constatar que el precalentamiento del aire en la zona del quemador tuvo su influencia en la concentración de los gases de combustión, como en el caso del CO, que disminuyó su concentración de 116 mg/Nm³ a 62 mg/Nm³ como se puede observar en la Figura 3.17.

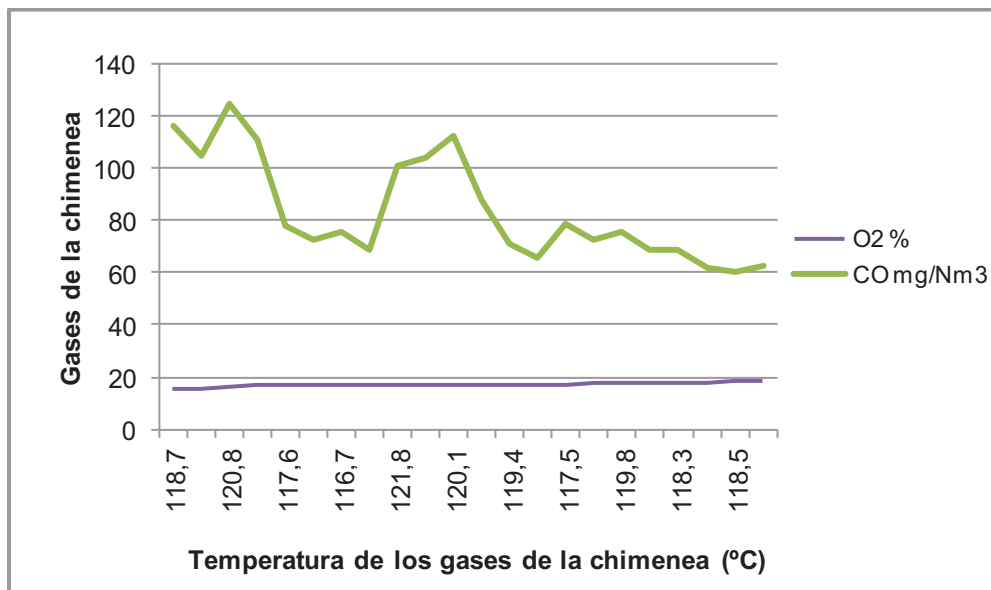


Figura 3.17. Concentración del CO que forma parte del gas de combustión

De igual manera, en la Figura 3.18 se puede observar que a medida que el porcentaje de oxígeno disminuyó debido a la modificación de los flujos de aire previamente precalentado, la concentración de CO₂ no tuvo mayor variación debido a que al ser parte del producto de la combustión es un indicativo más de que todo el combustible que ingresa a los quemadores se consumió durante la reacción.

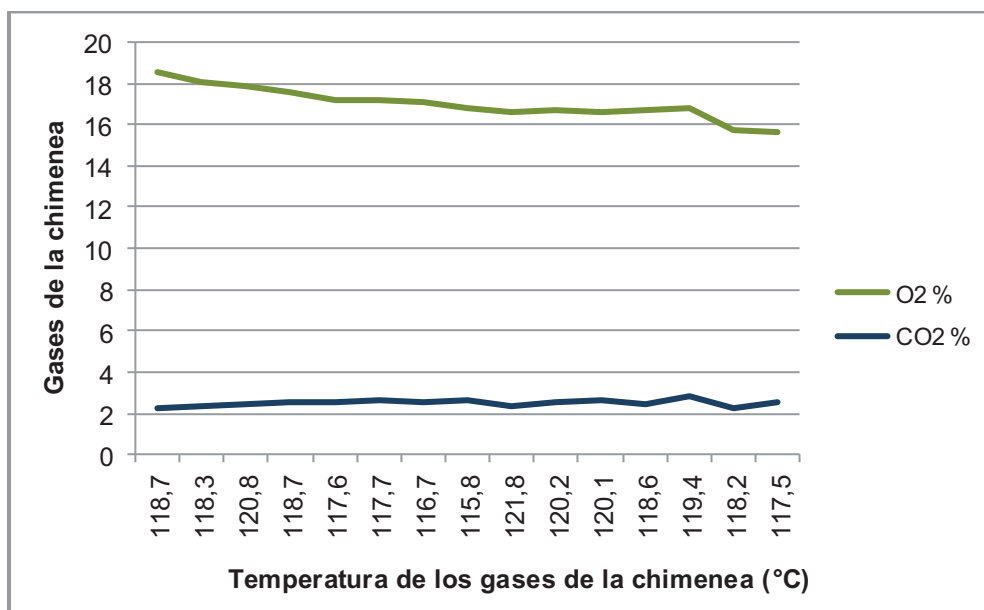


Figura 3.18. Concentración del CO₂ que forma parte del gas de combustión

3.3.5 BALANCE DE ENERGÍA FINAL

Para el balance energético a condiciones finales el calor absorbido por el producto y el calor perdido por las paredes del horno se mantendrán constantes ya que las condiciones internas del horno para una buena cocción de las piezas no permiten realizar modificaciones debido a que se correría el riesgo de dañar la producción.

Pero el calor generado por los gases de combustión y el calor generado por las pérdidas térmicas al ambiente si tendrán una variación debido a que las modificaciones realizadas afectan directamente al flujo másico de los gases y a la temperatura de salida de la chimenea, lo cual cambiará los valores del calor final requerido en el horno de quema de cerámicos y espera además un mejoramiento de la eficiencia de la combustión en el proceso.

3.3.5.1 Calor perdido por radiación

Tomando en cuenta que la temperatura final de los gases de combustión una vez realizado el precalentamiento del aire de combustión a través de la resistencia eléctrica adaptada al quemador fue de 118,7 °C y que la emisividad de las paredes del horno se mantiene constante durante todo el proceso, con un valor de 0,75 se determinó un calor generado por las pérdidas térmicas al ambiente de 107,84 W.

3.3.5.2 Calor transportado por los gases de combustión

Para la determinación del calor generado por los gases de combustión luego de la modificación, se volvió a analizar el aire que salía por la chimenea mientras se realizaron las calibraciones y con los datos de su composición tabulados en la Tabla 3.18, se determinaron las propiedades necesarias para calcular el calor específico cuyos valores se encuentran en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24. Valores de calor específico de los gases de combustión a 118,7 °C

PROPIEDAD	VALOR (kcal/kg x °C)
C _{pO₂}	0,98
C _{pCO₂}	0,86
C _{pN₂}	1,26

Por lo tanto:

$$Cp_{gc} = 1,2017 \frac{kJ}{kg * ^\circ C}$$

Una vez determinado el calor específico, se calculó el calor generado por los gases de combustión como se indica en la Ecuación 2.10 del literal 2.2.3.5 del capítulo de Metodología, tomando como referencia la masa de los gases que salen por la chimenea a las nuevas condiciones de operación como se indica a continuación:

$$Q_{gc} = 12,21 \frac{kg}{s} \times 1,2017 \frac{kJ}{kgx^\circ C} \times (118,7 - 65)^\circ C \times \frac{1\ 000\ W * s}{kJ}$$

$$Q_{gc} = 787\ 927,05\ W$$

3.3.5.3 Balance de energía final en el horno

Para conocer el calor total requerido en el horno fue necesario tomar en cuenta los resultados calculados anteriormente, los cuales se encuentran descritos en la Tabla 3.25, donde se ha modificado el calor transportado por los gases de combustión y el calor generado por las pérdidas al ambiente ya que ellos fueron afectados por la modificación realizada.

Tabla 3.25. Resultados de los calores generados y absorbidos durante el proceso de combustión en el horno de quema de cerámicos a condiciones finales

Propiedad	Valor(W)
Q _{pi}	2 769,19
Q _{pp}	3 221,29
Q _{ab}	86,56
Q _{gc}	787 927,05

Con estos resultados se determinó nuevamente el calor total requerido para el funcionamiento del horno tipo túnel el cual fue de 794,00 kW y a partir de este valor se calculó la nueva eficiencia de la combustión obteniendo los resultados que se encuentran detallados en la Figura 3.19.

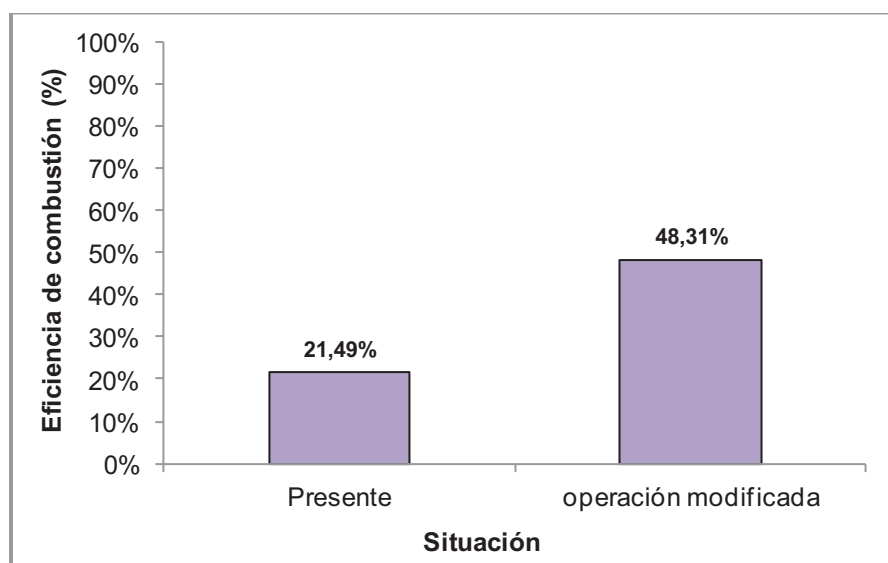


Figura 3.19. Eficiencia de combustión bajo condiciones iniciales y finales

3.4 RESULTADOS DEL ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROYECTO

Dentro del estudio económico del proyecto se consideraron los resultados del calor total requerido antes y después de la modificación realizada tomando en cuenta el aporte energético que representó el uso de la niquelina (resistencia

eléctrica) como parte de los costos de funcionamiento del horno túnel para todo el proceso.

3.4.1 COSTOS DEL GLP NECESARIOS PARA LA COMBUSTIÓN EN EL HORNO TIPO TÚNEL

Para determinar el costo del GLP que se consume para la combustión en el horno, se tomó en cuenta su precio en dólares por kg manejado por la Dirección Nacional de Hidrocarburos (DNH) que está vigente en el país actualmente, es decir 0,98 USD/kg GLP para uso industrial y se evaluó como se indica en la Ecuación [2.15] en el capítulo de Metodología:

$$\begin{aligned} \text{costo GLP} &= 118,18 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 0,98 \frac{\text{USD}}{\text{kg}} \\ \text{costo GLP} &= 115,82 \frac{\text{USD}}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \times 30 \frac{\text{día}}{\text{mes}} \\ \text{costo GLP} &= 83\,387,80 \frac{\text{USD}}{\text{mes}} \end{aligned}$$

3.4.2 COSTOS DE LA NIQUELINA UTILIZADA PARA EL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN

Una vez determinada la potencia de la resistencia eléctrica para los 28 quemadores que funcionan en el horno y considerando el costo del kwh establecido desde el año 2011 que es de 8,97 USD/kwh*, se calculó el precio que representaría el precalentar de esta manera el aire que ingresa a los quemadores, obteniéndose los resultados expresados en la Ecuación [2.18].

$$\text{costo de la niquelina} = 949,31 \text{ kW} \times 8,97 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} \times \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}}$$

$$\text{costo de la niquelina} = 683\,506,03 \text{ USD/mes}$$

*Información proporcionada por la EEQ (Empresa Eléctrica Quito – 2013)

3.4.3 COSTOS ENERGÉTICOS PARA QUE SE REALICE LA COMBUSTIÓN

Para determinar el costo de la energía necesaria para que se realice la combustión en el horno antes de realizadas las modificaciones, se tomó en cuenta también el costo del kWh que se encuentra en vigencia desde el año 2011 y se realizaron los cálculos que se detallan en la Ecuación [2.16] del capítulo de Metodología.

$$\text{costo energético} = 353,16 \text{ kW} \times 8,97 \frac{\text{USD}}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \times 30 \frac{\text{día}}{\text{mes}}$$

$$\text{costo energético} = 76\,028,28 \frac{\text{USD}}{\text{mes}}$$

Una vez realizadas las modificaciones, se determinó nuevamente el costo de la energía necesaria para que se realice el proceso de combustión, agregándole además el costo de la energía necesario para precalentar el aire que ingresa a los quemadores a través de la resistencia eléctrica.

Por lo tanto, el costo de la energía necesaria para el proceso de combustión final fue de 170 932,32 USD/mes, al cual se le agregó el costo de la resistencia eléctrica utilizada para el precalentamiento del aire que ingresaba a los quemadores, sumando un total de 375 299,78 USD/mes.

Este cálculo permitió concluir que si bien es cierto que disminuyó el consumo energético del horno, al precalentar el aire que ingresa a los quemadores aumentó el consumo de energía debido a que el precalentamiento debe darse a todos los quemadores, por lo tanto podemos decir que el proyecto no resulta rentable y que se debería buscar otras alternativas más económicas para mejorar

la combustión. Como se mencionó en el capítulo de revisión bibliográfica, una de las alternativas para mejorar el consumo energético es el precalentamiento del aire que ingresa a los quemadores, pero el uso de una resistencia no permitió ver un ahorro energético, así que se podría buscar otras alternativas como por ejemplo la recirculación del aire caliente recuperado que sale del mismo proceso de cocción de las piezas cerámicas para que forme parte de la reacción de combustión dentro de los quemadores.

3.4.4 ANÁLISIS BENEFICIO/COSTO DEL PROYECTO

Como se mencionó en el capítulo de metodología, literal 2.4.4, este análisis es necesario para conocer si realmente el proyecto de investigación es o no rentable para la empresa, para lo cual fue necesario conocer los precios de costos que implica la elaboración de las piezas cerámicas y los precios a los que son vendidas al consumidor indicados en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Costos de las piezas cerámicas que ingresan al horno

PIEZAS CERÁMICAS	CANTIDAD	PRECIO DE COSTO POR UNIDAD (USD/día)	PRECIO DE VENTA POR UNIDAD (USD/día)
Inodoros	450	62,83	75,40
Lavabos	725	31,34	37,61
Urinaros	540	47,65	57,18
Accesorios	103	10	12

(Edesa, 2012)

Cabe mencionar que dentro de los precios de costo se encuentran incluidos los rubros por mano de obra, materia prima, consumo de combustible, consumo de energía, entre otros conociendo además que al horno ingresan aproximadamente 1 818 piezas/día.

Por lo tanto, para determinar el costo del funcionamiento mensual del horno tipo túnel se tomó en cuenta además del precio del costo de las piezas cerámicas, el

costo del consumo de combustible y de energía al inicio y una vez finalizado el proyecto como se indica en la Ecuación [2.19] de la página 65 del capítulo de Metodología, literal 2.4.2.2 y la Ecuación [3.6]:

$$C = 2\,332\,680,00 \frac{USD}{mes} + 55\,382,54 \frac{USD}{mes} + 205\,197,66 \frac{USD}{mes}$$

$$C = 2\,593\,260,20 \frac{USD}{mes}$$

$$B = \text{precio de venta de las piezas} \quad [3.6]$$

$$B = 2\,799\,313,50 \frac{USD}{mes}$$

Una vez realizado dicho análisis se procedió a determinar la relación B/C, dándonos un total de 1,07, por lo tanto antes de realizar las modificaciones de los flujos el funcionamiento del horno es rentable.

Luego de haber colocado la niquelina y modificado los flujos, se volvió a determinar dicha relación para conocer si en términos financieros el precalentamiento del aire que ingresa a los quemadores es rentable o no, obteniendo una relación B/C de 0,86 por lo tanto se puede concluir que el proyecto no es viable.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- La adecuación de una resistencia eléctrica para precalentar el aire que ingresa a los quemadores permitió una mejor combustión, un mejor aprovechamiento del aire que ingresaba al proceso y al mismo tiempo una mejora en la eficiencia de combustión que al inicio se encontraba en 78,35 % y luego de la modificación realizada aumentó a 85,96 %.
- Esto permitió también visualizar una disminución en la concentración de los componentes de los gases de combustión como en el caso del CO cuya concentración bajo de 77 ppm (138,77 mg/Nm³) a 61 ppm (64,40 mg/Nm³) una vez precalentado el aire de combustión; por lo tanto, el ahorro energético permitió disminuir el impacto ambiental ya que la Norma establece que el límite máximo permisible es de 100 mg/Nm³.
- Se determinó la influencia del exceso de aire en la temperatura de los gases de combustión que al inicio del proyecto tenían un valor de 112,9 °C y al finalizar las modificaciones debido a la adecuación de la niquelina aumentaron a 118,7 °C; esto a su vez tuvo un efecto positivo debido a que una mayor temperatura de los productos inmediatamente a la salida del quemador, será un indicativo de una mayor eficiencia de este equipo.
- Las predicciones teóricas de la combustión del GLP permitieron confirmar de manera experimental que se podía llegar a un ahorro considerable de combustible de 18 409,10 USD/mes pero existió un incremento en el consumo energético durante el proceso debido a la implementación de la resistencia eléctrica manteniendo cuidado de que la producción no se vea afectada por las modificaciones realizadas.
- El uso de la resistencia eléctrica como medio para precalentar el aire que

ingresaba a los quemadores también requería de consumo energético, el cual fue de 949,31 kW, por lo que los costos finales no fueron los esperados.

- No se pudo conseguir el ahorro económico de la energía utilizada para el funcionamiento del horno esperado debido a la influencia de haber implementado una resistencia a todos los quemadores del horno ya que el consumo energético fue de 375 299,78 USD/mes.
- La experimentación permitió mejorar las condiciones de operación, el consumo energético aumento debido a la resistencia eléctrica adecuada al quemador, como se pudo verificar en el análisis beneficio/costo, por lo tanto es necesario buscar otras alternativas de precalentamiento del aire que ingresa a los quemadores, como por ejemplo reutilizando el aire caliente recuperado para que ingrese nuevamente a los quemadores y forme parte de la combustión dentro del horno.
- Como se pudo observar durante la modificación de los flujos de entrada de aire y combustible al quemador, la generación de gases producto de la combustión disminuyó considerablemente; pero siempre fue importante tener en cuenta que una alimentación pobre de combustible y comburente podía aumentar la generación de los gases, por lo que se trabajó nivelando al mismo tiempo la generación de los gases de combustión y la presión del aire que ingresaba a los quemadores.

4.2 RECOMENDACIONES

- Antes de iniciar las adecuaciones o modificar las condiciones de operación de los quemadores, es necesario realizar la limpieza de los mismos, ya que muchas veces los combustibles tienen partículas de hollín o carbón, que podrían afectar a las piezas durante su cocción y aumentarían la concentración de los gases que salen por la chimenea.

- Llevar registros generales de la combustión, como presión, temperatura, aire y combustible antes y durante la realización del proyecto; ya que no solo la chimenea nos mide la eficiencia del proceso.
- Revisar siempre que la relación aire/combustible se pueda controlar considerablemente para poder obtener una mayor eficiencia de la combustión sin llegar a producir una mayor cantidad de inquemados y por lo tanto controlar la producción de gases contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abbott, M., & Vanness, H., (1991). "*Termodinámica*". México: McGraw-Hill
2. Borman, L., (1998) "*Combustion Engineering*" (3ra ed). McGraw-Hill
3. Campos J., Mérido L. y Navarro E., "*Ahorro de Energía en la Industria Cerámica*". Recuperado de <http://www.si3eagov/Portals/0/Gie/Procesos/ceramica.pdf> (Mayo, 2013)
4. Dirección Nacional de Electricidad, (2008)
5. Faires, V. M., Simmang, C. M., y Brewer, A. V. (1993). "*Problemas de termodinámica*", México: Uteha
6. García, A. y Zapata, R., (2007) "*Hacia La Química*". Bogotá, Colombia: Temis S.A.
7. García, R., (2001). "*Combustión y Combustibles*" (2da ed). México D.F., México: Reverté
8. Gómez, C., (2009). "*Plan de eficiencia energética*". Recuperado de <http://www.si3ea.gov.co/Eure/9/inicio.html> (Noviembre, 2011)
9. Gómez, G., (2009). "*Todo sobre los Hornos*". Recuperado de <http://www.si3ea.gov.co/eure/9/inicio.html> (Abril, 2011)
10. Gutiérrez C. y Fernández A., "*Procesos energéticos*" (1era edición). México D.F.
11. Instrumentos de medición para productos de la combustión y emisiones, Recuperado de <http://www.logismarket.com.ar/ip/testo-analizadores->

de-gases-de-combustion-catalogo-instrumentos-de-medicion-para-productos-de-la-combustion-y-emisiones-testo-510405.pdf
(Noviembre, 2012)

12. Himmelblau, D., (1988). *"Balances de Materia y Energía"*(4ta ed). México: Prentice - Hall
13. Holman, J.,(1999).*"Transferencia de Calor"* (1era ed). Madrid, España: McGraw-Hill
14. Hougen, O., Watson, K. y Ragatz, R., (1988). *"Principios de los Procesos Químicos"*. Barcelona, España
15. Incropera, I., Witt, D.,(2002).*"Fundamentals of Heat and Mass Transfer"*. John Wiley & Sons
16. Manual de procedimientos operacionales de hornos túneles, hornos intermitentes y requema de EDESA, (2010)
17. Mavainsa, R, (2011). *"Combustión"*. Recuperado de http://www.mavainsa.com/documentos/3_combustion.pdf (Noviembre, 2012)
18. Mills, A., (1999). *"Transferencia de Calor"*. California, E.E.U.U: Adison-Wesley Iberoamericana
19. Ministerio del Ambiente., (1999), *"Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria"*, Ley No. 37, Registro Oficial 245 del 30 de julio de 1999
20. Molina, A., (1984). *"Manual de eficiencia energética térmica en la industria"*. Cadem 1984
21. Munson, B., Young, D. y Okiishi, T. (2002). *"Fundamentos de la Mecánica de*

Fluidos". México, México: Limusa S.A.

22. Passamai, V., (1993). *"Termodinámica básica"*. Salta: Universidad nacional de Salta
23. Perry, R., Green M. y Maloney W. (2001). *"Manual del Ingeniero Químico"* (7ma ed). Madrid: McGraw-Hill
24. Petroamazonas, (2008). *"Manejo y uso del GLP y del gas natural"*
25. Reed, R. J., (1986). *"North American Combustion Handbook"* (3ra ed)
26. Rendón, I. G., (2006). *"Ahorro energético controlando la combustión"*. Recuperado de <http://www.gas-training.com/files/AhorroEnergetico.pdf> (Febrero, 2011)
27. Serrano, J. C., (2004). *"Análisis Teórico de la Combustión en quemadores de Gas Natural"*. Cali, Colombia
28. Tamarit, B., (2000). *"Tecnología Energética, Universidad Politécnica de Valencia"*
29. Unger, T., (2008). *"El GLP, combustible de uso múltiple"*. Recuperado de <http://elcomercio.pe/edicionimpresa/Html/2008-09-09/el-glp-combustible-multiple-uso.html>; (Enero 2011)
30. Valderrama, J. (2012). *"Apuntes de la termodinámica"*. Recuperado de <http://www.citrevistas.cl/termo/TERMO2012-CAP-1.pdf> (Junio, 2012)
31. Valero, E., (2004). *"La Combustión"* (2da ed). Madrid, España: McGraw-Hill
32. Zemansky, M. y Van Ness, H., (1992). *"Termodinámica Técnica Fundamental"*. Aguilar, Madrid

33. World LPG Association (2012)

ANEXOS

ANEXO I

Planos del horno de quema de cerámicos donde se realizó el Proyecto de Titulación

ANEXO II

Ejemplo de cálculo de la velocidad promedio en el ducto o chimenea

Gases de Combustión antes de las modificaciones

El peso molecular seco (Md), se determinó mediante la aplicación de la siguiente ecuación tomada del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, anexo III, numeral 4.2.2.12, método 3, literal b para los gases de combustión como se indicó en la Ecuación [2.2] del capítulo de Metodología, literal 2.1.4.

$$Md = 0,44\%CO_2 + 0,32\%O_2 + 0,28\%CO + 0,28\%N_2$$

$$Md = 0,44 \times 2,07 + 0,32 \times 17,84 + 0,28 \times 0,008 + 0,28 \times 80,08$$

$$Md = 29,07 \frac{kg}{kg \text{ mol}}$$

Para la aplicación del procedimiento, el tubo Pitot, previamente calibrado, se introdujo en el conducto o chimenea, en el punto de medición seleccionado, y se tomó lectura de la presión de velocidad.

Este procedimiento se repitió para cada uno de los puntos de muestreo y la velocidad promedio en el conducto o chimenea sería entonces el valor obtenido, mediante la Ecuación [2.1] del capítulo de Metodología, literal 2.1.3, para el promedio aritmético de todas las lecturas de presión de velocidad registradas.

$$V = Kp \times Cp + \sqrt{\Delta P} \times \sqrt{\frac{T_s}{P_s \times M_s}}$$

$$V = 34,97 \times 0,84 + \sqrt{0,22} \times \sqrt{\frac{386,81}{1,55 \times 28,36}}$$

$$V = 19,49 \frac{m}{s}$$

Donde:

- V : velocidad del gas en chimenea (m/s)
 Kp : constante de la ecuación de velocidad (34,97 sistema internacional)
 Cp : coeficiente del tubo Pitot, provisto por fabricante (adimensional)
 ΔP : presión de velocidad promedio (mm. H₂O ó pulg. H₂O)
 Ts : temperatura absoluta del gas en chimenea (°K)
 Ps : presión total absoluta en chimenea = presión atmosférica + presión estática en chimenea (mm Hg)
 Ms : peso molecular húmedo del gas en chimenea (g/g-mol)

El gasto volumétrico de cada una de las fuentes fijas de combustión se obtuvo multiplicando la velocidad promedio del gas y del aire que intervenía en el proceso por el área transversal del conducto o chimenea en el sitio de medición.

$$Q = V \times A$$

$$Q = 11,81 \frac{m}{s} \times 0,44m^2$$

$$Q = 5,20 \frac{m^3}{s}$$

Una vez obtenido la velocidad en cada zona del horno, se procedió a multiplicar cada flujo volumétrico por la densidad del aire, de esta manera se obtuvo el flujo másico en cada zona del horno y posteriormente se pudo realizar el balance de masa tomando en cuenta que el flujo másico que sale menos el que entra será siempre el flujo de aire que se consume durante la combustión.

ANEXO III

Velocidad de los flujos de aire en la entrada y salida del horno

FLUJOS DE ENTRADA DE AIRE AL HORNO

Zona de Aire de combustión

Tabla I.I. Velocidad en la zona de ingreso del aire para la combustión antes de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H ₂ O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,12	0,47	354,24	3,92	3,70	28,84	30,24
2	0,13	0,49	353,12	5,44	5,19	28,84	30,13
3	0,09	0,41	354,46	5,25	5,08	28,84	30,01
4	0,08	0,39	354,26	5,06	4,91	28,84	29,99
5	0,11	0,45	358,49	4,89	4,69	28,84	30,11
6	0,12	0,47	356,24	3,70	3,47	28,84	30,27
7	0,1	0,43	357,12	5,14	4,95	28,84	30,06
8	0,13	0,49	353,57	4,50	4,26	28,84	30,21
9	0,09	0,41	353,95	4,78	4,61	28,84	30,04
10	0,12	0,47	353,44	4,07	3,85	28,84	30,22
11	0,03	0,24	353,79	3,98	3,92	28,84	29,79
12	0,03	0,24	355,41	3,16	3,10	28,84	29,85
13	0,03	0,24	354,26	4,07	4,02	28,84	29,79
14	0,01	0,14	354,88	5,34	5,32	28,84	29,58
15	0,01	0,14	354,34	5,44	5,42	28,84	29,58

Tabla I.II. Velocidad en la zona de ingreso del aire para la combustión luego del precalentamiento

Medida	Caída de presión mm H ₂ O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,10	0,43	364,29	66,50	66,31	28,84	29,56
2	0,09	0,41	365,56	67,43	67,27	28,84	29,55
3	0,12	0,47	364,97	73,23	73,00	28,84	29,57
4	0,10	0,43	363,65	69,68	69,49	28,84	29,56
5	0,08	0,39	363,87	71,92	71,77	28,84	29,54
6	0,09	0,41	363,65	62,58	62,41	28,84	29,56
7	0,08	0,39	363,34	61,85	61,70	28,84	29,55
8	0,08	0,39	364,69	68,74	68,59	28,84	29,54
9	0,09	0,41	364,42	71,54	71,38	28,84	29,55
10	0,08	0,39	363,56	68,00	67,85	28,84	29,54
11	0,09	0,41	364,25	61,83	61,66	28,84	29,56
12	0,09	0,41	364,34	67,01	66,84	28,84	29,55
13	0,08	0,39	364,25	67,92	67,77	28,84	29,54
14	0,08	0,39	363,76	69,56	69,41	28,84	29,54
15	0,09	0,41	363,96	65,70	65,53	28,84	29,55

Zona de enfriamiento lento

Tabla I.III. Velocidad en la zona de enfriamiento lento antes de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H ₂ O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,25	0,68	313,24	5,25	4,78	28,84	30,40
2	0,22	0,64	314,23	4,13	3,72	28,84	30,47
3	0,24	0,67	314,69	5,32	4,88	28,84	30,38
4	0,26	0,70	313,47	5,34	4,86	28,84	30,42
5	0,28	0,72	313,65	5,36	4,84	28,84	30,46
6	0,21	0,63	313,38	5,25	4,86	28,84	30,31
7	0,25	0,68	312,93	5,38	4,91	28,84	30,39
8	0,23	0,66	314,41	5,36	4,93	28,84	30,35
9	0,28	0,72	313,57	4,61	4,09	28,84	30,55
10	0,21	0,63	313,33	5,53	5,14	28,84	30,29
11	0,23	0,66	314,12	4,63	4,20	28,84	30,43
12	0,25	0,68	314,33	5,29	4,82	28,84	30,40
13	0,24	0,67	313,56	5,40	4,95	28,84	30,37
14	0,25	0,68	313,32	4,97	4,50	28,84	30,44
15	0,23	0,66	313,61	5,57	5,14	28,84	30,33

Tabla I.IV. Velocidad en la zona de enfriamiento lento después de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H ₂ O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,13	0,49	325,67	13,30	13,06	28,84	29,83
2	0,14	0,51	326,71	13,88	13,62	28,84	29,84
3	0,13	0,49	326,66	14,72	14,48	28,84	29,81
4	0,15	0,53	326,12	14,48	14,20	28,84	29,85
5	0,11	0,45	326,79	13,67	13,47	28,84	29,79
6	0,12	0,47	326,48	14,78	14,55	28,84	29,79
7	0,14	0,51	325,19	14,31	14,05	28,84	29,83
8	0,13	0,49	324,21	13,51	13,26	28,84	29,83
9	0,13	0,49	326,87	13,92	13,67	28,84	29,82
10	0,13	0,49	327,11	13,90	13,66	28,84	29,82
11	0,12	0,47	326,89	13,67	13,45	28,84	29,81
12	0,12	0,47	326,12	13,88	13,66	28,84	29,81
13	0,12	0,47	325,43	14,10	13,88	28,84	29,80
14	0,13	0,49	326,22	13,86	13,62	28,84	29,82
15	0,13	0,49	326,86	13,58	13,34	28,84	29,83

Zona de enfriamiento intermedio

Tabla I.V. Velocidad en la zona de enfriamiento intermedio antes de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H ₂ O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,03	0,24	321,54	3,21	3,16	28,84	29,82
2	0,03	0,24	321,69	3,33	3,27	28,84	29,81
3	0,02	0,19	320,54	3,34	3,31	28,84	29,73
4	0,02	0,19	321,23	3,38	3,34	28,84	29,73
5	0,02	0,19	321,61	3,44	3,40	28,84	29,72
6	0,01	0,14	320,97	3,51	3,49	28,84	29,62
7	0,03	0,24	321,36	3,31	3,25	28,84	29,81
8	0,03	0,24	322,13	3,38	3,33	28,84	29,81
9	0,01	0,14	321,35	3,33	3,31	28,84	29,63
10	0,02	0,19	321,79	3,42	3,38	28,84	29,73
11	0,02	0,19	320,94	3,49	3,46	28,84	29,72
12	0,02	0,19	321,33	3,08	3,04	28,84	29,74
13	0,03	0,24	321,56	3,51	3,46	28,84	29,80
14	0,01	0,14	321,61	3,23	3,21	28,84	29,63
15	0,01	0,14	322,15	3,59	3,57	28,84	29,62

Tabla I.VI. Velocidad en la zona de enfriamiento intermedio después de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H₂O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,02	0,19	326,21	7,71	7,68	28,84	29,61
2	0,02	0,19	324,82	8,93	8,89	28,84	29,59
3	0,02	0,19	325,47	7,68	7,64	28,84	29,61
4	0,02	0,19	325,69	7,88	7,85	28,84	29,61
5	0,02	0,19	327,7	8,13	8,09	28,84	29,60
6	0,02	0,19	326,16	6,65	6,61	28,84	29,63
7	0,02	0,19	326,11	6,28	6,24	28,84	29,64
8	0,01	0,14	325,76	7,75	7,73	28,84	29,54
9	0,01	0,14	329,41	8,09	8,07	28,84	29,54
10	0,01	0,14	327,23	7,70	7,68	28,84	29,54
11	0,01	0,14	326,89	7,45	7,43	28,84	29,54
12	0,01	0,14	326,21	7,71	7,70	28,84	29,54
13	0,01	0,14	326,72	7,94	7,92	28,84	29,54
14	0,02	0,19	326,46	7,92	7,88	28,84	29,61
15	0,02	0,19	325,87	7,75	7,71	28,84	29,61

Zona de enfriamiento rápido

Tabla I.VII. Velocidad en la zona de enfriamiento rápido antes de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H ₂ O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,02	0,19	314,64	2,26	2,22	28,84	29,80
2	0,03	0,24	314,22	2,73	2,67	28,84	29,85
3	0,03	0,24	315,59	2,56	2,50	28,84	29,87
4	0,03	0,24	314,73	2,32	2,26	28,84	29,89
5	0,03	0,24	314,91	2,26	2,20	28,84	29,90
6	0,02	0,19	314,67	2,30	2,26	28,84	29,80
7	0,03	0,24	315,18	2,54	2,48	28,84	29,87
8	0,03	0,24	314,23	2,67	2,62	28,84	29,86
9	0,02	0,19	314,72	2,39	2,35	28,84	29,79
10	0,03	0,24	314,91	2,37	2,32	28,84	29,89
11	0,03	0,24	315,34	2,48	2,43	28,84	29,88
12	0,03	0,24	314,28	2,65	2,60	28,84	29,86
13	0,03	0,24	314,46	2,48	2,43	28,84	29,88
14	0,01	0,14	314,35	2,47	2,45	28,84	29,66
15	0,01	0,14	314,49	2,30	2,28	28,84	29,67

Tabla I.VIII. Velocidad en la zona de enfriamiento rápido después de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H₂O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,01	0,14	338,16	5,02	5,01	28,84	29,58
2	0,01	0,14	339,29	5,08	5,06	28,84	29,58
3	0,02	0,19	337,71	5,12	5,08	28,84	29,67
4	0,01	0,14	338,89	4,95	4,93	28,84	29,59
5	0,02	0,19	339,78	4,80	4,76	28,84	29,68
6	0,02	0,19	338,43	4,74	4,71	28,84	29,68
7	0,01	0,14	338,25	4,71	4,69	28,84	29,59
8	0,01	0,14	337,22	3,94	3,92	28,84	29,61
9	0,01	0,14	336,89	4,65	4,63	28,84	29,59
10	0,02	0,19	337,91	4,60	4,56	28,84	29,68
11	0,01	0,14	336,29	4,54	4,52	28,84	29,59
12	0,01	0,14	337,23	4,50	4,48	28,84	29,60
13	0,01	0,14	336,66	4,71	4,69	28,84	29,59
14	0,01	0,14	338,12	5,25	5,23	28,84	29,58
15	0,02	0,19	338,28	5,12	5,08	28,84	29,67

FLUJOS DE SALIDA DEL AIRE EN EL HORNO

Chimenea de gases de combustión

Tabla I.IX. Velocidad en la chimenea de Gases de Combustión antes de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H ₂ O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,12	0,47	386,8	1,77	1,55	28,47	2,96
2	0,13	0,49	385,3	1,76	1,51	28,39	2,99
3	0,12	0,47	386,6	1,68	1,46	28,48	3,05
4	0,13	0,49	385,9	1,74	1,49	28,52	3,01
5	0,12	0,47	386,7	1,70	1,48	28,53	3,03
6	0,14	0,51	384,8	1,66	1,40	28,52	3,10
7	0,15	0,53	385,2	1,74	1,46	28,52	3,04
8	0,13	0,49	386,6	1,72	1,48	28,50	3,03
9	0,15	0,53	386,1	1,70	1,42	28,50	3,09
10	0,14	0,51	381,5	1,79	1,53	28,49	2,96
11	0,15	0,53	382,6	1,76	1,48	28,49	3,02
12	0,16	0,55	383,3	1,79	1,49	28,49	3,00
13	0,14	0,51	385,5	1,61	1,34	28,52	3,17
14	0,14	0,51	384,2	1,66	1,40	28,49	3,10
15	0,13	0,49	382,3	1,76	1,51	28,46	2,98

Tabla I.X. Velocidad en la chimenea de Gases de Combustión después de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H₂O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,11	0,45	391,70	0,43	0,22	28,53	32,92
2	0,12	0,47	391,30	0,41	0,19	28,58	33,43
3	0,12	0,47	393,80	0,52	0,30	28,62	32,59
4	0,10	0,43	391,70	0,54	0,35	28,63	32,06
5	0,13	0,49	390,60	0,54	0,30	28,63	32,70
6	0,12	0,47	390,70	0,47	0,24	28,66	32,92
7	0,11	0,45	389,70	0,49	0,28	28,65	32,53
8	0,12	0,47	388,80	0,50	0,28	28,66	32,67
9	0,11	0,45	394,80	0,45	0,24	28,58	32,79
10	0,10	0,43	393,20	0,47	0,28	28,63	32,40
11	0,10	0,43	393,12	0,45	0,26	28,68	32,50
12	0,11	0,45	391,62	0,49	0,28	28,63	32,54
13	0,10	0,43	392,44	0,43	0,24	28,68	32,62
14	0,10	0,43	391,17	0,45	0,26	28,59	32,50
15	0,10	0,46	390,54	0,37	0,16	28,62	33,56

Zona de aire caliente recuperado

Tabla I.XI. Velocidad en la zona de aire caliente recuperado antes de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H ₂ O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,01	0,14	493,6	3,70	3,68	28,84	29,67
2	0,02	0,19	494,5	3,62	3,59	28,84	29,80
3	0,02	0,19	494,3	3,57	3,53	28,84	29,80
4	0,01	0,14	494,7	3,51	3,49	28,84	29,68
5	0,02	0,19	495,1	3,53	3,49	28,84	29,80
6	0,01	0,14	494,6	3,46	3,44	28,84	29,68
7	0,01	0,14	494,1	3,34	3,33	28,84	29,69
8	0,01	0,14	493,7	3,64	3,62	28,84	29,67
9	0,01	0,14	493,5	3,62	3,61	28,84	29,67
10	0,02	0,19	494,1	3,57	3,53	28,84	29,80
11	0,02	0,19	494,7	3,68	3,64	28,84	29,79
12	0,02	0,19	494,5	3,46	3,42	28,84	29,81
13	0,03	0,24	495,1	3,51	3,46	28,84	29,90
14	0,01	0,14	493,7	3,61	3,59	28,84	29,67
15	0,01	0,14	494,6	3,59	3,57	28,84	29,67

Tabla I.XII. Velocidad en la zona de aire caliente recuperado después de las modificaciones

Medida	Caída de presión mm H₂O	$\Delta P^{(1/2)}$	°K	Presión Total mmHg	Presión total absoluta mmHg	Ms	Velocidad del gas m/s
1	0,02	0,19	491,55	5,06	5,02	28,84	29,73
2	0,02	0,19	489,98	5,36	5,32	28,84	29,72
3	0,01	0,14	489,54	5,12	5,10	28,84	29,62
4	0,01	0,14	490,49	5,62	5,60	28,84	29,61
5	0,01	0,14	489,43	5,10	5,08	28,84	29,62
6	0,01	0,14	490,44	4,46	4,45	28,84	29,64
7	0,02	0,19	490,3	4,24	4,20	28,84	29,76
8	0,01	0,14	491,32	5,40	5,38	28,84	29,62
9	0,01	0,14	492,22	5,01	4,99	28,84	29,63
10	0,01	0,14	489,49	5,49	5,47	28,84	29,62
11	0,01	0,14	490,38	5,59	5,57	28,84	29,61
12	0,01	0,14	491,65	5,17	5,16	28,84	29,62
13	0,01	0,14	490,43	4,74	4,73	28,84	29,63
14	0,02	0,19	489,27	5,17	5,14	28,84	29,73
15	0,01	0,14	490,98	4,46	4,45	28,84	29,64

ANEXO IV

ORDENANZA 213, RESOLUCIÓN 0001-SA-2010, LITERAL 5.2



- 5.2 Toda fuente fija de combustión que funcione dentro del Distrito Metropolitano de Quito no podrá emitir al aire cantidades superiores a las indicadas en la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4.

TABLA 1. VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES AL AIRE PARA FUENTES FIJAS DE COMBUSTIÓN

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	UNIDADES ⁽¹⁾	Valores máximos
Material Particulado	Sólido ⁽²⁾	mg/Nm ³	200 ⁽³⁾
	Bunker	mg/Nm ³	200 ⁽³⁾
	Diesel	mg/Nm ³	150 ⁽³⁾
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido ⁽²⁾	mg/Nm ³	900 ⁽³⁾
	Bunker	mg/Nm ³	700 ⁽³⁾
	Diesel	mg/Nm ³	500 ⁽³⁾
	Gaseoso	No Aplicable	140 ⁽³⁾
Dióxido de Azufre	Sólido ⁽²⁾	mg/Nm ³	No Aplicable
	Bunker	mg/Nm ³	1650 ⁽³⁾
	Diesel	mg/Nm ³	1650 ⁽³⁾
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Monóxido de Carbono	Sólido ⁽²⁾	mg/Nm ³	1800 ⁽³⁾
	Bunker	mg/Nm ³	300 ⁽³⁾
	Diesel	mg/Nm ³	250 ⁽³⁾
	Gaseoso	No Aplicable	100 ⁽³⁾

Fuente: Dirección Metropolitana Ambiental

ANEXO V

TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN AMBIENTAL SECUNDARIA (TULAS), CAPITULO VI, ANEXO III



4.2.2.1 A fin de permitir la medición de emisiones de contaminantes del aire desde fuentes fijas de combustión, estas deberán contar con los siguientes requisitos técnicos mínimos:

- a. plataforma de trabajo, con las características descritas en la figura 1 (Anexo),
- b. escalera de acceso a la plataforma de trabajo,
- c. suministro de energía eléctrica cercano a los puertos de muestreo.

4.2.2.2 Método 1: definición de puertos de muestreo y de puntos de medición en chimeneas.- este método provee los procedimientos para definir el número y ubicación de los puertos de muestreo, así como de los puntos de medición al interior de la chimenea.

4.2.2.3 Número de puertos de muestreo.- el número de puertos de muestreo requeridos se determinará de acuerdo al siguiente criterio:

- a. dos (2) puertos para aquellas chimeneas o conductos de diámetro menor 3,0 metros,
- b. cuatro (4) puertos para chimeneas o conductos de diámetro igual o mayor a 3,0 metros.

4.2.2.4 Para conductos de sección rectangular, se utilizará el diámetro equivalente para definir el número y la ubicación de los puertos de muestreo.

4.2.2.5 Ubicación de puertos de muestreo.- los puertos de muestreo se colocarán a una distancia de, al menos, ocho diámetros de chimenea corriente abajo y dos diámetros de chimenea corriente arriba de una perturbación al flujo normal de gases de combustión (ver figura 1, Anexo). Se entiende por perturbación cualquier codo, contracción o expansión que posee la chimenea o conducto. En conductos de sección rectangular, se utilizará el mismo criterio, salvo que la ubicación de los puertos de muestreo se definirá en base al diámetro equivalente del conducto.

4.2.2.11 Para la aplicación del procedimiento, el tubo Pitot, previamente calibrado, se introducirá en el conducto o chimenea, en el punto de medición seleccionado, y se tomará lectura de la presión de velocidad. Este procedimiento se repetirá para



cada uno de los puntos de medición seleccionados. La velocidad promedio en el conducto o chimenea será el valor obtenido, mediante la siguiente ecuación, para el promedio aritmético de todas las lecturas de presión de velocidad registradas.

$$V = K_p C_p \sqrt{\Delta P} \sqrt{\frac{T_s}{P_s M_s}}$$

donde:

- V : velocidad del gas en chimenea (m/s ó ft/s);
- K_p : constante de la ecuación de velocidad (34,97 sistema internacional ó 85,49 unidades inglesas);
- C_p : coeficiente del tubo Pitot, provisto por fabricante (adimensional);
- ΔP : presión de velocidad promedio (mm. H₂O ó pulg. H₂O);
- T_s : temperatura absoluta del gas en chimenea (°K ó °R);
- P_s : presión total absoluta en chimenea = presión atmosférica + presión estática en chimenea (mm Hg ó pulg. Hg);
- M_s : peso molecular húmedo del gas en chimenea (g/g-mol ó libras/libra-mol);

El gasto volumétrico de la fuente fija de combustión se obtendrá multiplicando la velocidad promedio del gas por el área transversal del conducto o chimenea en el sitio de medición.

4.2.2.12 Método 3: procedimiento para la determinación del peso molecular seco de los gases de escape. Este método comprende:

- a. Uso de un analizador de gases para determinación de contenido de dióxido de carbono, oxígeno y monóxido de carbono en los gases de escape. El analizador de gases podrá ser cualquiera de los modelos disponibles localmente, tales como Fyrite, Orsat o analizadores con tecnología de celdas electroquímicas. Se debe reconocer que algunos de estos instrumentos proveen resultados para dos de los tres parámetros requeridos, por lo que se aceptará el uso de cartas, figuras, nomogramas, ecuaciones, u otros medios, que permitan determinar el tercer parámetro a partir de dos parámetros conocidos.
- b. El peso molecular seco (M_d), se determinará mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$M_d = 0.44\% \text{ CO}_2 + 0.32\% \text{ O}_2 + 0.28\% \text{ CO} + 0.28\% \text{ N}_2$$

El porcentaje de nitrógeno N_2 se obtendrá restando del 100%, el % de CO_2 , el % de O_2 y el % de CO.

- c. Cuando no sea posible determinar el contenido de dióxido de carbono, de oxígeno y de monóxido de carbono en los gases de escape, se podrá utilizar el valor de 30,0 (treinta) para el peso molecular seco, siempre que la fuente fija opere con combustibles fósiles sólido, líquido o gaseoso.