



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

TEMA:

“Análisis de parámetros técnicos para la mejora de la eficiencia en prototipo de quemador a gas semi industrial.”

Trabajo de Titulación, Modalidad Trabajo Experimental previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato

Autor: Kevin Daniel López Ramos

Tutor: Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda Mg.

Ambato-Ecuador
2025

APROBACION DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“ANÁLISIS DE PARÁMETROS TÉCNICOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN PROTOTIPO DE QUEMADOR A GAS SEMI INDUSTRIAL.”**, elaborado por el estudiante Kevin Daniel López Ramos, portador de la cédula de ciudadanía número 1850511351, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo de titulación, bajo la modalidad experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, enero 2026



.....
Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACION

Yo, **Kevin Daniel López Ramos**, con C.C. 1850511351 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente Trabajo de Titulación, Trabajo Experimental con el tema: **“ANÁLISIS DE PARÁMETROS TÉCNICOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN PROTOTIPO DE QUEMADOR A GAS SEMI INDUSTRIAL.”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, enero 2026



.....
Kevin Daniel López Ramos

C.C.: 1850511351

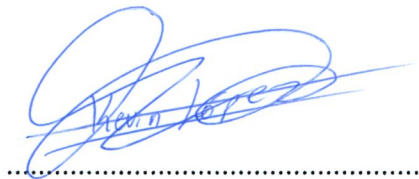
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, enero 2026



Kevin Daniel López Ramos

C.C.: 1850511351

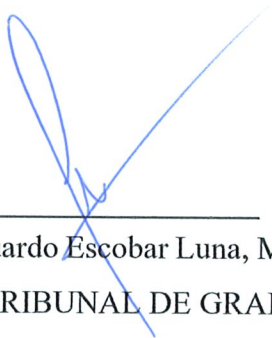
AUTOR

APROBACION DEL TRIBUNAL DE GRADO

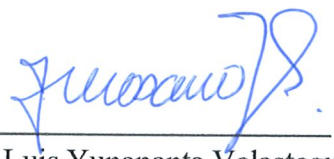
Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante **Kevin Daniel López Ramos**, de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“ANÁLISIS DE PARÁMETROS TÉCNICOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN PROTOTIPO DE QUEMADOR A GAS SEMI INDUSTRIAL.”**, Trabajo Experimental

Ambato, enero 2026

Para constancia firman:



Ing. Luis Eduardo Escobar Luna, Msc
MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO



Ing. José Luis Yunapanta Velastegui, Msc
MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO

DEDICATORIA

Yo le dedico esta tesis, con todo cariño y agradecimiento a mis padres: Ángel Leonardo Lopez Paredes, Rosa Guadalupe Ramos Morales. Agradezco por su amor incondicional, apoyo constante, palabra de aliento y ejemplo de perseverancia para enfrentar cada reto y luchar con todas mis fuerzas por lograr esta meta. Su confianza y amor han sido el motor que me ha impulsado a continuar con paso firme en este camino. Este logro también es de ustedes, sin su dirección y sacrificio, esto no sería posible.

Kevin Daniel López Ramos

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo. Primero, a mis padres, Ángel Leonardo López Paredes y Rosa Guadalupe Ramos Morales, por su apoyo incondicional, amor y paciencia durante todo este proceso.

Agradezco profundamente a los docentes de la Universidad Técnica de Ambato, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, carrera de Mecánica, por su valiosa enseñanza, orientación y respaldo durante toda mi formación académica.

También doy las gracias a mi tutor por compartir su conocimiento, orientar mi trabajo y motivarme a seguir aprendiendo y superándome.

De igual manera, agradezco a mis compañeros y amigos, quienes brindaron su apoyo y ánimo en los momentos difíciles.

Finalmente, doy gracias a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a que este proyecto se concretara.

Kevin Daniel López Ramos

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	I
APROBACION DEL TUTOR	II
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACION	III
DERECHOS DE AUTOR	IV
APROBACION DEL TRIBUNAL DE GRADO	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
INDICE DE TABLAS.....	XII
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
RESUMEN EJECUTIVO	XIV
ABSTRACT.....	XV
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1. Antecedentes	1
1.1. 1. Justificación	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos:	2
1.3. Marco teórico	3
1.3.1. Quemadores	3
1.3.2. Combustible (GLP).....	3
1.3.3. Coeficiente de exceso de aire	3
1.3.4. Eficiencia	4
1.3.5. Variable independiente: Parámetros técnicos.....	5
1.3.5.1. Presión	5
1.3.5.2. Flujo.....	5
1.3.6. Variable dependiente (Eficiencia).....	6
1.3.6.1. Aprovechamiento (Q útil)	6
1.3.6.2. Pérdidas por transferencia de calor.	6
1.3.6.4. Pérdidas por inquemados sólidos	10
1.3.6.5. Temperatura de flama	11
1.3.6.6. Integridad de la flama	11
1.3.6.7. Boquillas.....	14
1.3.7. Termografía	18
1.3.8. Cámara termográfica.....	19
CAPÍTULO II	20
METODOLOGÍA.....	20
2. Recursos	20

2.1.	Variables	22
2.1.1.	Descripción de variables	22
2.2.	Métodos	24
2.2.1.	Método experimental	24
2.2.2.	Método bibliográfico	24
2.2.3.	Método cuantitativo	24
2.2.4.	Método cualitativo	24
2.2.5.	Método analítico	25
2.2.6.	Método Comparativo	25
2.3.	Procedimientos.....	25
2.3.1.	Descripción del prototipo de quemador semi industrial	25
2.3.2.	Recolección de datos de temperatura superficiales	26
2.3.3.	Recolección de datos de temperatura del aire	28
2.3.4.	Recolección de datos de velocidad.....	29
2.4.	Procedimiento para operar el quemador	30
2.5.	Etapas del proyecto	32
2.6.	Calculo térmico	33
2.6.1.	Combustión sin mezclador, 4 inyectores y con presión de gas de 3447.38 Pa (0.5 psi)	33
2.6.1.1.	Pérdidas de calor por convección natural	33
2.6.1.2.	Pérdidas de calor por radiación	35
2.6.1.3.	Pérdidas por inquemados sólidos	38
2.6.1.4.	Calor de reacción de combustión	38
2.6.1.5.	Cálculos de la entalpia de combustión	39
2.6.1.6.	Cálculo del calor teórico generado por la reacción de combustión	41
2.6.1.7.	Cálculo del flujo de calor del aire caliente generado por el quemador	42
2.6.1.8.	Cálculo del flujo de calor del aire caliente que escapa por la parte posterior del quemador	45
2.6.2.	Combustión con mezclador, 8 inyectores y con presión de gas de 3447.38 Pa (0.5 psi)	46
2.6.2.1.	Pérdidas de calor por convección natural	46
2.6.2.2.	Pérdidas de calor por radiación	48
2.6.2.3.	Pérdidas por inquemados sólidos	50
2.6.2.4.	Calor de reacción de combustión	50
2.6.2.5.	Cálculos de la entalpia de combustión	51
2.6.2.6.	Cálculo del calor teórico generado por la reacción de combustión	52
	Tomando en cuenta que el mezclador tiene una capacidad de 90000 BTU/h lo que equivale a 26.38 KW tenemos que:.....	53
2.6.2.7.	Cálculo del flujo de calor del aire caliente generado por el quemador	54
2.6.2.8.	Cálculo del flujo de calor del aire caliente que escapa por la parte posterior del	

quemador	56
CAPÍTULO III.....	57
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
3. Análisis y discusión de resultados	57
3.1. Representación de esquemas	57
3.2. Parámetros físicos durante su operación en condiciones reales	59
3.3. Análisis de oportunidades de mejora.....	59
3.3. 1. Análisis cuantitativo	59
a) Cálculo del rendimiento para el sistema sin mezclador a 0.5 psi con 4 inyectores en configuración + ...	60
b) Cálculo del rendimiento para el sistema con mezclador a 0.5 psi con 8 inyectores en configuración x	61
3.3.2. Análisis cualitativo	61
a) Características de la flama	61
b) Consumo de combustible.....	63
c) Aplicación de termografía infrarroja	64
d) Flujo de aire.....	65
3.4. Validación de la hipótesis	67
3.4.2. Hipótesis	67
3.4.3. Comparación de resultados	67
CAPÍTULO IV	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
4.1. Conclusiones	70
4.2. Recomendaciones.....	71
BIBLIOGRAFÍA	72
Anexos	75
Anexo A-1: Determina conductividad térmica, viscosidad cinemática y número de Prandtl	75
Anexo A-2: Entalpía de deformación.....	76
Anexo A-3: Propiedades del oxígeno.....	77
Anexo A-4: Propiedades del Nitrógeno.....	78
Anexo A-5: Propiedades del dióxido de carbono	79
Anexo A-6: Propiedades del vapor de agua	80
Anexo A-7: Propiedades atmosféricas a gran altitud.....	81
Anexo A-8: Propiedades del aire.....	82
Anexo B-1: Ficha de medición de temperatura del flujo caliente que escapa por enfrente y por la parte de atrás	83
Anexo B-2: Análisis de la llama.....	86
Anexo B-3: Termografía	90
.....	90

ANEXO B-4: Ficha de consumo de GLP	94
ANEXO B-5: Flujo de aire	97
Anexo C1: Ficha técnica	102

INDICE DE TABLAS

Tabla I Índice de Bacharach	10
Tabla II Diferentes tipos de llamas simples	12
Tabla III Especificaciones del mezclador aire-combustible	18
Tabla IV Accesorios requeridos para las pruebas experimentales.....	20
Tabla V Lista de herramientas necesarias para el proceso experimental.....	21
Tabla VI Lista de equipos	22
Tabla VII Cuadro de operacionalización de variables	23
Tabla VIII Resumen de ficha técnica.....	25
Tabla IX Manómetros de baja y alta presión	26
Tabla X Entalpia de combustión sistema sin mezclador y 4 inyectores	40
Tabla XI Entalpias de formación reactivos del sistema sin mezclador y 4 inyectores	41
Tabla XII Entalpias de formación productos del sistema sin mezclador y 4 inyectores	42
Tabla XIII Esquema de distribución de calor	43
Tabla XIV Entalpia de combustión del sistema con mezclador y 8 inyectores	51
Tabla XV Entalpias de formación reactivos del sistema con mezclador y 8 inyectores	52
Tabla XVI Entalpias de formación productos del sistema con mezclador y 8 inyectores	53
Tabla XVII Esquema de distribución del calor en el sistema con 8 inyectores	54
Tabla XVIII Imagen de cada parámetro de operación	62
Tabla XIX Comparación cualitativa	62
Tabla XX Termografía de cada parámetro de operación	64
Tabla XXI Resultados cuantitativos y cualitativos de las pruebas	67

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debido a la actividad molecular	7
Fig. 2 Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por convección.	8
Fig. 3 Intercambio de radiación: (a) en una superficie y (b) entre una superficie y un gran entorno	9
Fig. 4 Espectro de luz visible.....	12
Fig. 5 Forma y color de la llama con relación al exceso de aire en la combustión de gas natural y Fueloil.....	12
Fig. 6 Tipos de boquillas de combustible para quemadores	15
Fig. 7 Variables que afectan el coeficiente de descarga del orificio	16
Fig. 8 Instrucciones de instalación del mezclador	17
Fig. 9 Mezclador aire-combustible	18
Fig. 10 Equipo FLIR E8-XT.....	27
Fig. 11 Ubicación de la cámara termográfica	28
Fig. 12 Termocupla Sesko	28
Fig. 13 Colocación del sensor de la termocupla	29
Fig. 14 Anemómetro	29
Fig. 15 Flujo de procesos del proyecto	32
Fig. 16 Sumatoria coeficientes de perdidas por convección y radiación.....	37
Fig. 17 Medida de la distribución del calor generado.....	44
Fig. 18 Medida de distribución 2	54
Fig. 19 Estructura original del quemador	57
Fig. 20 Estructura con inyectores a 45°.....	58
Fig. 21 Estructura con 8 inyectores.....	58
Fig. 22 Diagrama de pérdidas y calor útil del sistema sin mezclador.....	60
Fig. 23 Diagrama de pérdidas y calor útil del sistema con mezclador	60

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo experimental se enfoca en el análisis de parámetros técnicos y térmicos para mejorar la eficiencia energética de un prototipo de quemador a gas GLP semi industrial, utilizado en procesos esenciales y aplicaciones agroindustriales. Se busca la optimización del rendimiento térmico, reducir las pérdidas de energía y mejorar la combustión en sistemas convencionales.

El objetivo principal fue evaluar la influencia de las variables operativas, como la presión de suministro de gas y flujo de aire, su comportamiento térmico y la eficiencia del sistema. Para esto, se realizaron pruebas experimentales en distintas configuraciones: sin mezclador y con mezclador, operando a presiones de 4 psi y 0.5 psi. Se realizaron mediciones de temperatura superficial mediante cámara y análisis termográficos, adicionalmente cálculos de transferencia de calor y eficiencia directa.

Los resultados mostraron que la implementación del mezclador de gas mejoró de forma considerable la estabilidad del fuego, reduciendo el ruido de la llama y permitiendo una combustión más homogénea. Cuantitativamente, el rendimiento térmico directo aumenta del 75.43% al 78.63%, mientras que las pérdidas por inquemados se redujeron de 6.07% al 3.27%, lo que indica una mayor conversión de energía útil. Además, el flujo del calor generado presenta una ligera mejora, desde 12.66 hasta 12.87 kW.

Cualitativamente, la flama mostro diferencias importantes entre las configuraciones que se evaluaron. Con una alta presión y sin mezclador, la flama presentó tonalidades azul tenue, un comportamiento irregular y una elevada turbulencia. Por otro lado, cuando se utilizó un mezclador en condiciones de baja presión, la flama se volvió más uniforme, un tono azul más visible, estabilidad y prácticamente silenciosa.

En conclusión, el análisis de los parámetros técnicos y térmicos ha confirmado que la integración del mezclador aire-gas y la correcta regulación de la presión mejoran el rendimiento térmico del sistema, incrementando la eficiencia energética, reduciendo las pérdidas y mejorando la estabilidad de la llama.

DESCRIPTORES: EFICIENCIA ENERGÉTICA, QUEMADOR A GAS, MEZCLADOR AIRE-COMBUSTIBLE, ANÁLISIS TÉCNICO, COMBUSTIÓN

ABSTRACT

This experimental work focuses on the analysis of technical and thermal parameters to improve the energy efficiency of a prototype semi-industrial LPG gas burner used in essential processes and agro-industrial applications. The aim is to optimize thermal performance, eliminate energy losses, and improve combustion stability in conventional systems.

The main objective was to evaluate the influence of operating variables, such as gas supply pressure and airflow, on their thermal behavior and system efficiency. To this end, experimental tests were conducted in different configurations: with and without a mixer, operating at pressures of 4 psi and 0.5 psi. Surface temperature measurements were taken using a camera and thermographic analysis, in addition to calculations of heat transfer and direct efficiency.

The results showed that the implementation of the gas mixer significantly improved flame stability, reducing flame noise and allowing for more homogeneous combustion. Quantitatively, direct thermal efficiency increased from 75.43% to 78.63%, while unburned fuel losses decreased from 6.07% to 3.27%, indicating greater conversion of useful energy. Furthermore, the heat output improved slightly, from 12.66 kW to 12.87 kW.

Qualitatively, the flame showed important differences between the configurations that were evaluated. With high pressure and without a mixer, the flame presented faint blue tones, irregular behavior and high turbulence. On the other hand, when a mixer was used in low pressure conditions, the flame became more uniform, a more visible blue tone, stability and practically silent.

In conclusion, the analysis of the technical and thermal parameters has confirmed that integrating the air-gas mixer and properly regulating the pressure improve the system's thermal performance, increasing energy efficiency, reducing losses, and improving flame stability.

KEYWORDS: ENERGY EFFICIENCY, GAS BURNER, AIR-FUEL MIXER, TECHNICAL ANALYSIS, COMBUSTION

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Justificación

La eficiencia energética en los quemadores a gas semi industriales es un tema crítico, ya que muchos de estos sistemas operan por debajo de su potencial, resultando en un alto consumo de combustible y emisiones contaminantes. El limitado análisis sistemático de parámetros técnicos, como la relación aire-combustible y la temperatura de operación, no ayuda a la identificación de oportunidades de mejora. Dado el aumento de normativas ambientales y la necesidad de reducir costos operativos, este trabajo se propone investigar estos parámetros para desarrollar recomendaciones que optimicen la eficiencia de los quemadores, contribuyendo a un uso más sostenible de la energía en el sector industrial [1].

Los quemadores semi industriales son componentes esenciales para la generación y transmisión de calor, estos son aplicados en los procesos de combustión de procesos semi industriales, pero estos no tienen la capacidad y complejidad igual a los quemadores de industriales de alta producción[1]. A pesar de su menor complejidad que los quemadores industriales estos equipos enfrentan grandes desafíos de eficiencia lo que afecta a costos de operación. La falta de mantenimiento adecuado podría afectar en gran medida a su falta de eficiencia.

La mejora en la eficiencia en quemadores semi industriales significaría un menor consumo de combustible por unidad térmica producida, lo cual representaría una reducción de costos y además de emisiones de gases contaminantes al ambiente[1]. La optimización podrá contribuir a tener una mejor sostenibilidad en procesos industriales al disminuir la dependencia de recursos energéticos. Por esta razón se propone analizar parámetros técnicos de un prototipo de quemador a gas semi industriales con el fin de identificar oportunidades de mejora que optimicen su eficiencia operativa.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar parámetros técnicos de un prototipo de quemador a gas semi industriales con el fin de identificar oportunidades de mejora en su eficiencia.

1.2.2. Objetivos específicos:

- ✓ Examinar variables como presión de gas y flujo de aire.
- ✓ Identificar aspectos técnicos como calor y pérdidas que influyen en la eficiencia.
- ✓ Realizar pruebas de funcionamiento para identificar oportunidades de mejora.

1.3.Marco teórico

1.3.1. Quemadores

Un quemador es un dispositivo que mezcla combustible con un agente oxidante que por lo general es aire, para facilitar la combustión controlada, esto permite la liberación de energía térmica en procesos térmicos industriales y sistemas de calefacción [2].

1.3.2. Combustible (GLP)

El GLP es ampliamente utilizado en aplicaciones residenciales, comerciales y también industriales, algunas de sus ventajas pueden ser[4]:

- Tiene un alto poder calorífico en comparación a otras fuentes de energía.
- Puede satisfacer varias necesidades energéticas como única fuente.
- Se puede transportarlo con facilidad además de poder almacenarlo.

Las ventajas de la utilización del GLP pueden derivar en desventajas que se las describe a continuación[4]:

- Ya que su almacenamiento y transporte resultan muy sencillos, puede generar un exceso de confianza durante su manipulación, lo que incrementa el riesgo de accidentes que pongan en peligro la integridad física de las personas.
- Los cilindros de GLP suelen almacenarse en espacios reducidos, sin ventilación y en ocasiones apilados entre sí, situación que incrementa los riesgos asociados a su manipulación.

1.3.3. Coeficiente de exceso de aire

La presencia de exceso de aire permite evitar la presencia de inquemados y humos, el exceso de aire también conlleva que exista mayores pérdidas de calor en los productos del proceso de la combustión. Ahí se establece uno de los principales parámetros que debemos controlar [3].

Es la relación que hay entre el volumen de aire aplicado a un proceso de combustión y el volumen preciso para una combustión estequiométrica [5]. Este se representa como un numero adimensional (n) cuyo valor puede ser:

$n=1$; aire perfecto para una combustión estequiométrica.

$n<1$; defecto de aire, quiere decir que la mezcla es rica pero la combustión es incompleta.

$n>1$; existe un exceso de aire, la mezcla es pobre pero la combustión puede ser completa.

Los quemadores industriales por lo general suelen operar con un exceso de aire del 20%, para minimizar los riesgos ante posibles gases inquemados. Pero usar cantidades excesivas podría generar pérdidas energéticas y utilizar cantidades bajas produciría que la mezcla no contenga suficiente aire y combustible además de generar inquemados y sus respectivos riesgos [6].

1.3.4. Eficiencia

La eficiencia de un quemador está ligada a la energía química que es capaz de ser transformada en calentamiento de los productos de combustión, y es el 100 por ciento si toda la energía que esta almacenada en el combustible es convertida en calor disponible para el proceso [3].

Las instalaciones de combustión consumen una gran cantidad de combustible y energía eléctrica, pero tienen un gran potencial de mejora de eficiencia y de ahorro. En la actualidad el avance tecnológico permite proponer técnicas para la mejora de eficiencia energética, el quemador y la caldera cumplen 3 requisitos básicos que son: elevado rendimiento, reducidas emisiones y seguridad de funcionamiento [5].

La eficiencia térmica se puede representar como el porcentaje de energía del combustible que se convierte en energía útil, está representado como [7]:

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{combustible}} \times 100 \quad \text{Ec. 1. 1}$$

Donde:

Q_{util} : Energía térmica útil (calor transferido al sistema objetivo) (kJ)

$Q_{combustible}$: Energía contenida en el combustible (kJ)

1.3.5. Variable independiente: Parámetros técnicos

1.3.5.1.Presión

En un quemador la presión es la fuerza que ejerce el gas (GLP) y el aire de combustión sobre las superficies del sistema. La presión influye en la formación de la mezcla aire-combustible y con esto en la eficiencia de la combustión [8].

Si aplicamos una presión correcta en el sistema permitirá que una mezcla correcta de aire y combustible. Sin embargo, si la presión es baja. La mezcla se verá afectada y ocurrirá una combustión incompleta y reduce la eficiencia. Por otro lado, una presión muy alta producirá un aumento en las emisiones de contaminantes, como los óxidos de nitrógeno (NOx), lo que dañará los componentes del quemador [9].

$$P = \frac{m}{RT} AV \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde:

P: Presión del gas (psi)

R: Constante de los gases (J/kg*K)

T: Temperatura absoluta (°K)

A: Área de la boquilla (m^2)

1.3.5.2.Flujo

Es la cantidad de aire o combustible que fluye hacia el quemador por unidad de tiempo. Este flujo es importante para mantener una combustión eficiente, ya que este determina la cantidad de oxígeno que va a estar disponible para reaccionar con el combustible[11].

Al no tener un flujo de aire suficiente puede generar una combustión incompleta, esto reducirá su eficiencia además de producir en mayor cantidad la emisión de gases como el monóxido de carbono (CO). Por otra parte, un flujo excesivo producirá una sobre marcha de la combustión, lo que generará pérdidas de calor y un menor rendimiento[9].

El número de Reynolds para evaluar el flujo de aire en tuberías esta expresada como:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Ec. 1.3}$$

1.3.6. Variable dependiente (Eficiencia)

1.3.6.1. Aprovechamiento (Q útil)

Es la energía térmica efectivamente utilizada durante el proceso (como la calefacción de agua o generación de vapor) en comparación con la energía total generada. El aprovechamiento o el calor útil representa la eficiencia de la combustión en el aprovechamiento de la energía térmica [12].

Si tenemos un alto aprovechamiento de calor esto nos indicaría que la energía que genera la combustión está siendo utilizada en su gran mayoría para el proceso, y esto indica que existe un gran rendimiento del quemador. No obstante, si existe un bajo aprovechamiento, indicaría que una gran parte de energía se está perdiendo, lo que indicaría una eficiencia baja y un gran consumo de combustible [11].

La ecuación de aprovechamiento (calor útil) tiene base en la combustión del combustible y la eficiencia térmica del sistema. Según Yunus Cengel [12], El calor útil se puede expresar como:

$$Q_{util} = \eta * m_f * PCI \quad \text{Ec.1.4}$$

Donde:

Q útil: Calor útil generado por el quemador (W o J/s)

n: Eficiencia térmica del quemador (adimensional o %)

m_f: flujo masico del combustible (kg/s)

PCI: poder calorífico interior del gas (J/kg o J/m³)

1.3.6.2. Pérdidas por transferencia de calor.

Este tipo de pérdidas se refiere a la energía que no se aprovecha debido a ineficiencias, como los son la radiación, conducción y convección no controladas o la salida de gases calientes sin aprovechar[13].

Las pérdidas por calor son un indicador clave de ineficiencia. Si existe una gran

pérdida de energía térmica a través de la superficie del sistema o por los gases de escape, el rendimiento general del quemador se verá afectado, lo que resultara en un mayor consumo de combustible para mantener la misma producción térmica [11].

En un quemador, las pérdidas de calor pueden ocurrir de las tres formas antes mencionadas como lo son:

- **Conducción:** Ocurre transferencia de calor a través de los materiales que conforman el quemador.

La conducción térmica está ligada directamente con los fenómenos que ocurren a escala atómica y molecular, ella que son procesos microscópicos son los que mantienen este mecanismo de transferencia de calor. Es decir, la conducción es el traspaso de energía desde partículas con mayor nivel energético hacia aquellas con menor energía, esto debido a interacción que ocurren entre ellas [14].

Al someter las moléculas a temperaturas elevadas hace que esas moléculas posean mayor energía cinética. En consecuencia, se producen colisiones entre las demás moléculas, esto hace que se transfiera energía de las más energéticas hacia las de menor energía. Por lo tanto, en presencia de un gradiente térmico, la conducción de calor se manifiesta siempre en la dirección en la que la temperatura disminuye [14].

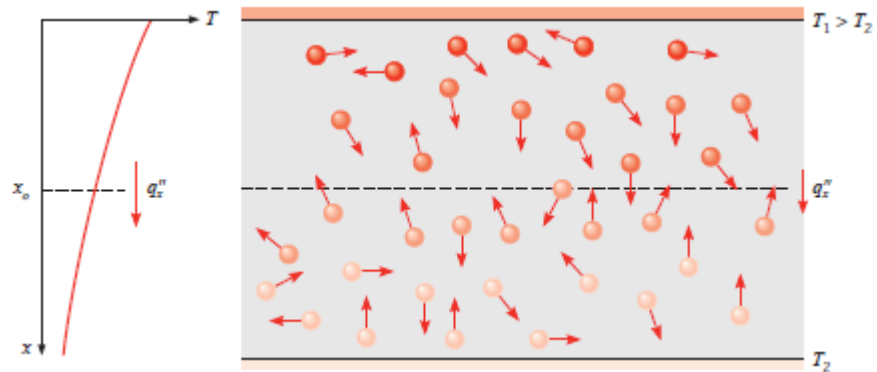


Fig. 1 Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debido a la actividad molecular [14].

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde:

- q_{cond} : Flujo de calor por conducción (W)

- k : conductividad térmica del material (W/m*k)
- A : área de transferencia (m^2)
- $\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura (K/m)

- **Convección:** Ocurre transferencia de calor al aire circundante debido al movimiento de los fluidos.

La convección resulta de combinar dos procesos, por un lado, está la difusión de energía producida por el movimiento aleatorio de las moléculas, y, por otro lado, está la transferencia de energía asociado al movimiento microscópico del fluido. Este último ocurre gracias a un gran número de moléculas se desplaza colectivamente en forma de corrientes [14].

Cuando existe un gradiente de temperatura, estos dos mecanismos actúan de manera simultánea: el movimiento aleatorio da como resultado la difusión de energía, mientras que el desplazamiento global del fluido contribuye mediante transporte advectivo. Entonces la convección es el resultado de la superposición de ambos efectos [14].

En ingeniería el termino convección se utiliza para describir el transporte combinado de energía, por otro lado, la advección se refiere puntualmente al componente debido al movimiento macroscópico del fluido. Este fenómeno es de gran relevancia en la transferencia de calor que se establece entre una superficie sólida y un fluido en movimiento cuando existe una diferencia de temperaturas entre ambos [14].

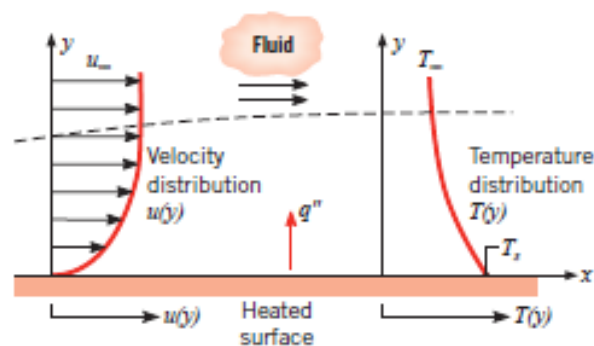


Fig. 2 Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por convección. [14]

Ec.1.2

$$q_{conv} = hA(T_s - T_{\infty})$$

Donde:

- q_{conv} : Calor transferido por convección (W)

- h : Coeficiente convectivo de transferencia de calor ($W/m^2 * K$)
- A : área de la superficie en contacto (m^2)
- T_s : Temperatura de la superficie (K)
- T_∞ : Temperatura del fluido lejano (K)

- **Radiación:** Emisión de calor en forma de energía electromagnética.

Es energía emitida por la materia cuando su temperatura es superior al cero absoluto. Por lo general los análisis se enfocan en superficies sólidas, este fenómeno también se presenta en líquidos y gases. En cualquiera de los estados de la materia, la emisión radiante está asociada a las transiciones en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas que la conforman [14].

La energía que se libera se propaga en forma de ondas electromagnéticas, o de manera equivalente a fotones, muestra un modo de transporte distinto a la conducción y convección ya que este no requiere de un medio material para moverse. De hecho, la radiación térmica alcanza su máxima eficiencia en condiciones de vacío donde la transferencia energética no encuentra resistencia por parte de la materia [14].

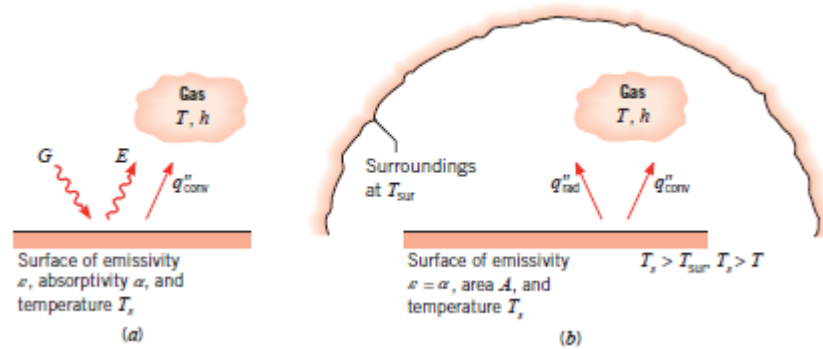


Fig. 3 Intercambio de radiación: (a) en una superficie y (b) entre una superficie y un gran entorno [14].

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad \text{Ec.1.3}$$

Donde:

- q_{rad} : Calor transferido por radiación (W)
- ϵ : Emisividad de la superficie
- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$: Constante de Stefan-Boltzmann
- A : Área emisora (m^2)

- T_s : Temperatura absoluta de la superficie (K)
- T_{amb} : Temperatura absoluta del entorno (K)

1.3.6.3. Transferencia simultánea de calor por convección y radiación

En sistemas térmicos donde una superficie se encuentra a una temperatura elevada y expuesta al entorno, como ocurre comúnmente en los quemadores a gas, el calor puede transferirse al ambiente mediante diferentes mecanismos al mismo tiempo. Los más relevantes en estos casos son la convección, que ocurre por el movimiento del aire en contacto con la superficie, y la radiación térmica, que se manifiesta por la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas. Estos mecanismos operan de manera simultánea e independiente desde la misma superficie, lo que implica que su efecto combinado se traduce en una mayor pérdida de energía hacia el entorno [13].

Desde un punto de vista analítico, estas transferencias se consideran en paralelo, ya que no dependen una de la otra y actúan de una forma directa desde el sistema hacia el ambiente. Por tanto la pérdida total de calor se calcula como la suma de las tasas individuales de transferencia por convección y radiación [13], [14].

1.3.6.4. Pérdidas por inquemados sólidos

La pérdida por inquemados sólidos corresponde a la fracción del combustible que no alcanza a oxidarse completamente durante el proceso de combustión, esto genera residuos sólidos como el carbón o partículas de hollín. Este tipo de pérdidas disminuye de manera considerable la eficiencia del quemador. Por otro lado, si la combustión se realiza de forma correcta este tipo de pérdidas van a ser bajas de forma relativa, para lograr detectar los inquemados sólidos se aplica el método de Bacharach, la cual se puede calcular con la siguiente expresión [15].

$$P_i = 0.4 * B^2 + 0.8B + 0.07 \quad Ec.1.7$$

Donde:

B: Índice de Bacharach

El índice de Bacharach esta dado por la siguiente tabla:

Tabla I Índice de Bacharach [16]

Índice de Bacharach	Características	Calificación
1	Presencia de hollín nulo	Excelente
2	Presencia de hollín reducido. Temperatura en los humos baja.	Bueno
3	Cierta cantidad de hollín	Mediana
4	Hollín visible	Pobre
5	Marcas de hollín muy visible	Muy pobre
6-9	Las marcas de hollín son severamente visibles	Pobrísimas

1.3.6.5. Temperatura de flama

Es en nivel de calor que se alcanza durante la combustión. La temperatura está ligada a la presión, el flujo de aire y la relación aire-combustible. La temperatura es de suma importancia para garantizar una combustión eficiente y completa [11].

Si tenemos una temperatura baja en nuestro sistema, la combustión será incompleta y se generará productos como hollín, CO y partículas. Además de reducir la eficiencia del quemador, aumentará la emisión de contaminantes. Si tenemos temperaturas demasiado altas, aunque puede acelerar la velocidad de la reacción, también producirá NO_x, contaminantes que afecten la calidad del aire [12].

1.3.6.6. Integridad de la flama

¿Qué nos indica el color de la flama?

El color de una flama depende de su temperatura, debido a que esta está relacionada de forma proporcional a la cantidad de calor desprendido y se ve reflejado también en la cantidad de radiación emitida [16].

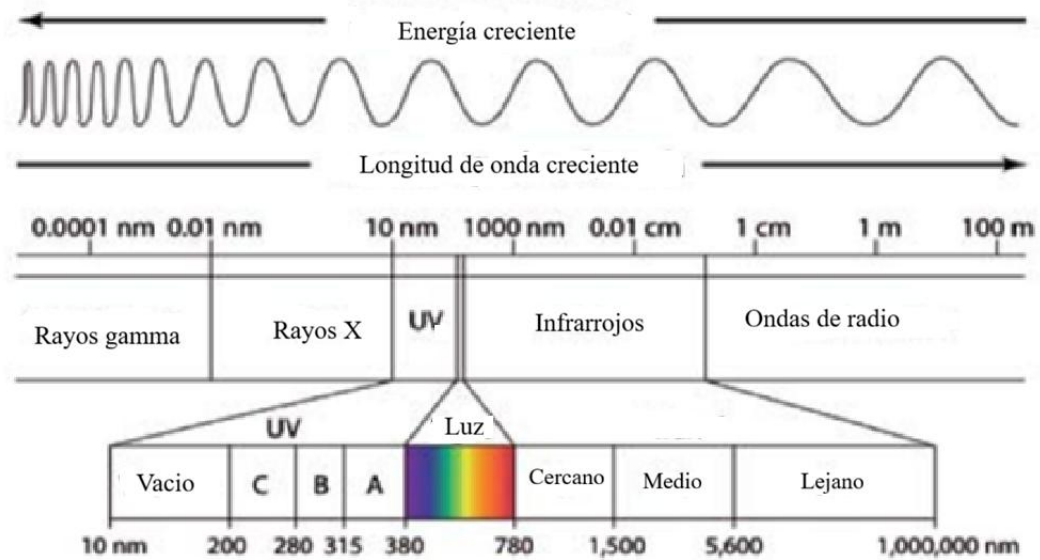


Fig. 4 Espectro de luz visible [18]

Una llama presenta diferentes colores dependiendo de la presencia de oxígeno en la reacción y de la temperatura que alcance. También va a depender de la cantidad de la mezcla aire combustible, eso presentara una mayor velocidad de propagación a la cual se produce la combustión. Por otro lado, hay que tomar en cuenta que dependiendo del tipo de combustible se presentará un color de llama, si quemamos gas natural o gas licuado la llama tendrá tonalidades de azul en situaciones cercanas a la estequiometria [16].

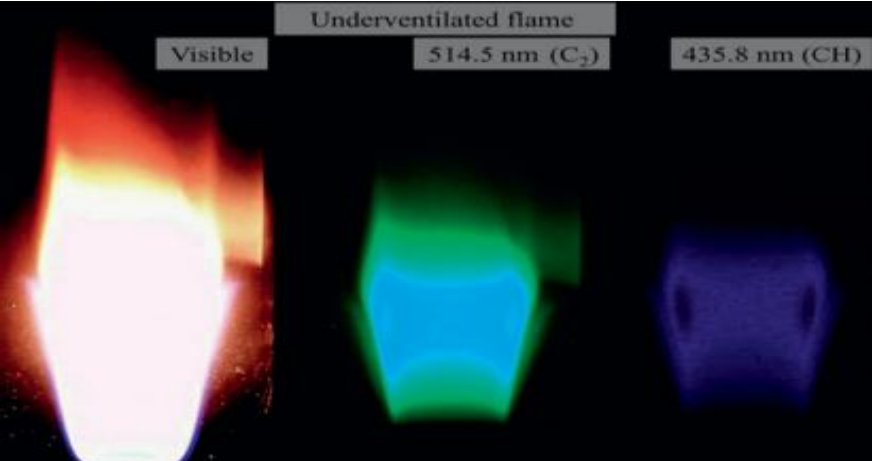
A continuación, se presenta una tabla que nos resumen los tipos de llama:

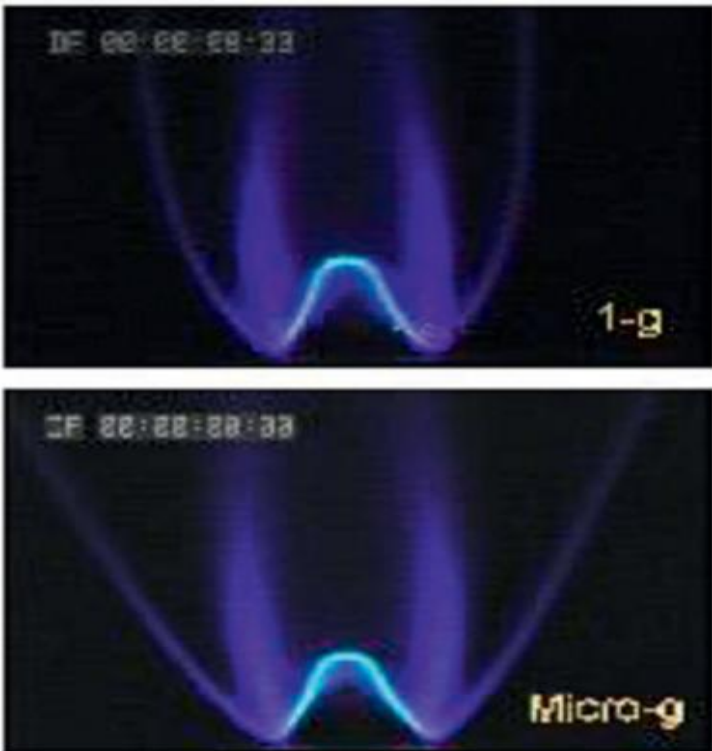
Suministro de aire	Tipo de Combustible	
	Gas natural	Fueloil
Deficiencia de aire	Llama con tendencia amarilla	Llama con tendencia oscura
Aire correcto	Llama celeste con leves puntas rosadas	Llama rojiza o amarillenta brillante
Exceso de aire	Llama muy azul y semitransparente	Llama muy clara y brillante

Fig. 5 Forma y color de la llama con relación al exceso de aire en la combustión de gas natural y Fueloil [18].

A continuación, se muestran distintos tipos de llamas con el metano como combustible:

Tabla II Diferentes tipos de llamas simples [17]

Característica	Imagen
Llamas de difusión laminar sobre ventiladas, estas llamas están cerradas sobre el eje de simetría del quemador	 CH₄, Overventilated flame Visible 514.5 nm (C₂) 435.8 nm (CH)
Llamas sub ventiladas están abiertas y terminan sobre el tubo de oxidante externo	 Underventilated flame Visible 514.5 nm (C₂) 435.8 nm (CH)
Llama de aire y metano premezclado en un quemador de ranura en estado estacionario. Las ranuras tienen una forma de cruz sobre una tapa circular. Tiene una relación de equivalencia casi estequiométrica y un caudal lo suficientemente alto para que los bordes de la llama se despesquen del quemador mientras que el núcleo central sigue anclado	

Llamas triples de metano sometidas a condiciones normales (1g) y microgravedad (ug), un combustible rico en aire y metano de una ranura interior y una mezcla pobre de combustible mezcla de dos ranuras exteriores simétricas	
---	--

1.3.6.7.Boquillas

Las boquillas en un quemador tienen una tarea fundamental ya que controlan el flujo del gas y la formación de la llama, lo que afecta de manera directa a la eficiencia. Hay distintos tipos de boquillas y cada una tiene características específicas:

- **Boquillas de flujo estándar:** están diseñadas para tener un suministro uniforme de gas [18].
- **Boquillas de mezcla en boquilla:** Mezclan el aire y el combustible dentro de la misma boquilla y garantizan una combustión homogénea [19].
- **Boquillas de pulverización:** Este logra automatizar el combustible logrando una mayor superficie de contacto con el aire [20].
- **Boquillas especiales:** están diseñadas para condiciones especiales y específicas como alta presión o mezclas de combustibles [19].

1.3.6.8.Factores que afectan la eficiencia

- **Diseño de la boquilla:** Puede llegar a afectar el patrón de distribución de la llama y la mezcla de aire-combustible [20].
- **Tamaño del orificio:** Este tamaño determina el caudal de gas y la presión de salida, y afecta directamente la velocidad de combustión [18].
- **Condiciones operativas:** La presión del combustible y las características del

aire que está en el ambiente son cruciales en el proceso [20].

El mal diseño de una boquilla puede llevar a que la combustión sea incompleta lo que genera hollín y monóxido de carbono, generara perdida de energía en forma de calor que no será utilizado además de que se incrementara el consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes. Sin embargo, el buen diseño de una boquilla puede garantizar una mejor transferencia de energía el medio deseado lo que reducirá emisiones de contaminantes y residuos, esto nos permitirá tener un mayor ahorro de costos operativos ya que tendremos un menor consumo de combustible [18], [19], [20]. En la industria de los quemadores se usas muchos tipos de boquillas de combustible, dependiendo de la aplicación. En la fig. 6 se muestran varios tipos de boquillas que se usan comúnmente en la industria. Cada boquilla tiene un diseño interno diferente. La forma interna puede afectar en gran medida el caudal masico del combustible [21].



Fig. 6 Tipos de boquillas de combustible para quemadores [21]

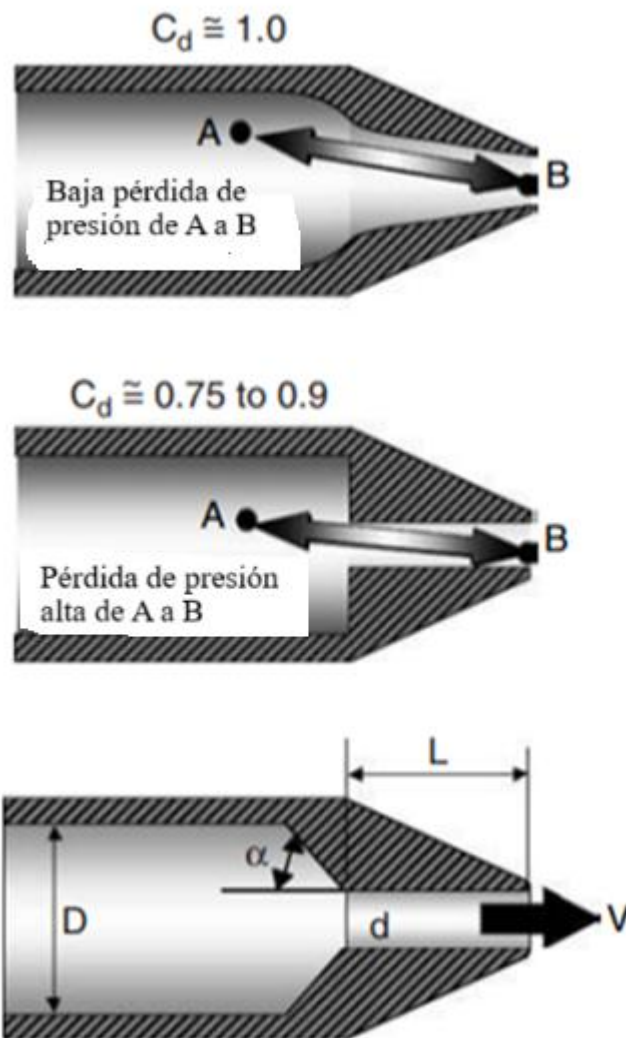


Fig. 7 Variables que afectan el coeficiente de descarga del orificio [21]

En la Fig. 7 se muestra el interior de dos boquillas del mismo diámetro, si suponemos que ambas boquillas están funcionando en condiciones idénticas podemos deducir que la primera boquilla es con la que el combustible fluiría mejor ya que existe menor caída de presión [21].

1.3.6.9. Válvula mezcladora de aire de gas propano LP, 1/2", latón macizo, 90 K BTU

Un mezclador de aire-gas es un componente mecánico que añade aire al gas antes de la combustión. Esto funciona como un limpiador y una llama más caliente, lo que reduce la probabilidad de que quede un depósito de hollín negro. Un mezclador de aire funciona creando vacío y aspirando gas hacia el gas propano similar a un carburador,

el mezclador de aire tiene una sección más estrecha dentro de una sección de tubería que acelera el flujo de gas. Al aumentar la velocidad se crea un vacío que provoca que se aspire aire a través de un conjunto de orificios alrededor del mezclador de aire. Este proceso se llama efecto Venturi [22].

El mezclador este compuesto por tres partes que son:

- a) El propio mezclador de aire
- b) Un enchufe (FNPT x FNPT)
- c) Un pezón (MNPT x MNPT)

FNPT significa NPT femenino (hilo de tubería nacional), MNPT significa NPT masculino [22].

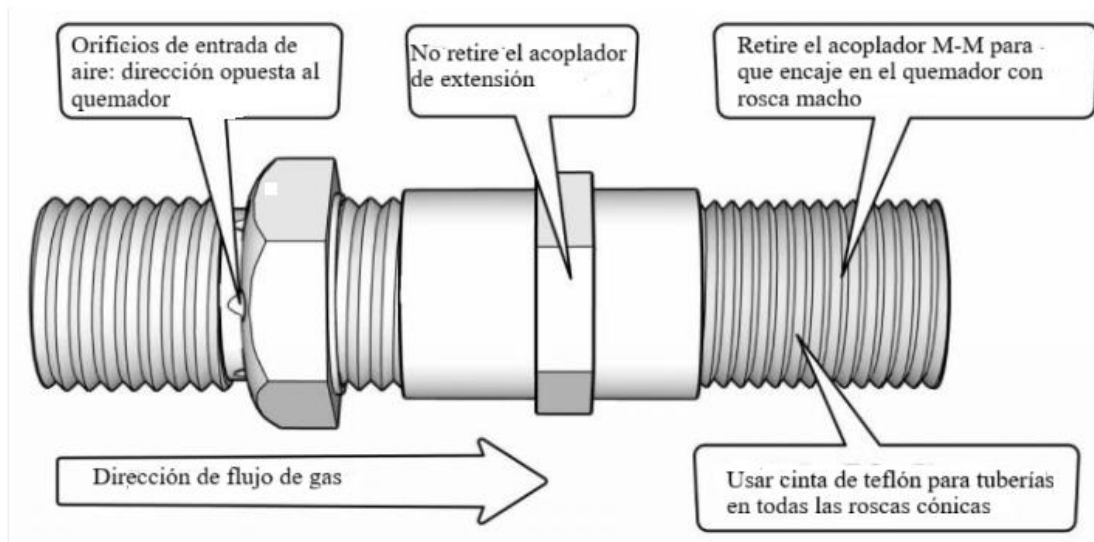


Fig. 8 Instrucciones de instalación del mezclador [22]



Fig. 9 Mezclador aire-combustible [23]

A continuación, se especifican las características del mezclador aire combustible:

Tabla III Especificaciones del mezclador aire-combustible [23]

Clasificación BTU:	Soporta quemadores de hasta 90000 BTU
Conexiones:	½" NPT con funda extraíble para conexión macho hembra
Construcción:	Latón macizo para mayor resistencia y durabilidad a largo plazo
Instalación:	Se coloca directamente en la conexión de gas para un ajuste seguro
Función:	Mezcla aire con combustible para una combustión limpia y reducción de hollín
Diseño:	Los puertos de admisión estilo Venturi garantiza la relación aire-gas correcta

1.3.7. Termografía

Se puede definir a la termografía como una técnica que nos permite medir temperaturas a cierta distancia y sin contacto físico con el objeto de estudio, captando la intensidad de la radiación infrarroja emitida por los objetos. Esto se logra a través de cámaras termográficas, estas convierten la energía que irradia un objeto en una imagen visible que se forma partiendo de la temperatura en la superficie del objeto [24].

1.3.8. Cámara termográfica

Las cámaras termográficas o también conocidas como cámara térmica, cámara de infrarrojos o cámara de calor, se diseñan con el objetivo de detectar y visualizar las variaciones de temperatura en distintos materiales y entornos. El funcionamiento de estas cámaras se basa en el principio de la radiación térmica, este fenómeno indica que todos los cuerpos emiten energía en forma de infrarrojos según su temperatura [25].

La cámara termográfica tiene un sensor que es capaz de detectar la radiación infrarroja emitida por cualquier objeto, incluso cuando se está en completa oscuridad. Luego, esta información la convierte en señales eléctricas que generan una imagen térmica en la que los diferentes niveles de temperatura son representados con distintos colores [25].

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2. Recursos

Para las pruebas experimentales en el prototipo de quemador a gas semi industrial se incorporó un mezclador de aire-gas (LPG air nozzle), además de que el prototipo llevaba tiempo sin funcionar por lo que algunas de sus partes tuvieron que ser reemplazadas y estos se detallan en la siguiente Tabla II.

Tabla IV Accesorios requeridos para las pruebas experimentales

Accesorios		
Ítem	Descripción	Fotografía
Bushing	$\frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{4}$ " acero inoxidable. Es un elemento que comúnmente se lo utiliza en instalaciones de gas y facilita el movimiento de dos o más ejes	
Acople	$\frac{1}{2}$ " acero inoxidable. Es necesario para poder utilizar el Bushing	
Codo	$\frac{1}{2}$ " acero inoxidable. Permite cambiar la orientación de accesorios	
Válvula mezcladora de aire	Componente de latón con potencia de 90000 BTU/h. Es un componente mecánico que inyecta aire al combustible antes de la combustión	

Tabla V Lista de herramientas necesarias para el proceso experimental

Herramientas		
Ítem	Descripción	Fotografía
Llave Stilson	Se usa principalmente para ajustar o aflojar tuberías metálicas.	
Llave ajustable	Es ideal para sujetar objetos de formas irregulares, como tuberías, tuercas grandes o piezas redondeadas.	
Guaípe	Es un trapo absorbente para limpiar	
Desarmador plano	Herramienta con una punta plana que se usa para apretar o aflojar tornillos con una ranura recta. También se le dice destornillador plano.	

Tabla VI Lista de equipos

Herramientas		
Ítem	Descripción	Fotografía
Cámara termográfica	Cámara infrarroja capaz de medir la temperatura de superficies	
Termocupla	Puede medir la temperatura de los gases	
Anemómetro	Mide la velocidad	

Este capítulo se basa puntualmente en consideraciones importantes para el análisis y mejora de la eficiencia del prototipo de quemador a gas semi industrial. Para ello, se evaluaron parámetros técnicos clave que influyen en su desempeño, como lo son la presión del gas y el flujo de aire. Además, se realizaron pruebas experimentales para identificar oportunidades de optimización y mejora. También se describieron los métodos investigativos empleados en el presente estudio, detallando los procedimientos, instrumentos y las técnicas utilizadas en la evaluación del prototipo.

2.1. Variables

2.1.1. Descripción de variables

Tabla VII Cuadro de operacionalización de variables

PARÁMETROS TÉCNICOS				Variable independiente		
Variable	Indicativo	Significado	Unidad de medida	Método de medición	Instrumento de medición	Frecuencia de medición
Presión	Valor de presión aplicada al GLP y al aire	Fuerza ejercida por un fluido (gas o aire)	Psi-Pa	Lectura directa de presión	Manómetro o sensor de presión	Continuo o en intervalos regulares
Flujo	Caudal masico de aire suministrado al sistema	Cantidad de aire que fluye hacia el quemador	Kg/s	Medición de flujo masico	Sensor de flujo masico	Continuo o en intervalos regulares
Eficiencia				Variable dependiente		
Temperatura	Temperatura alcanzada en la zona de combustión	Temperatura que se alcanza en la combustión del quemador	°C	Lectura directa en puntos clave	Termómetro, cámara térmica	Continuo o cada 7 minutos
Aprovechamiento (Q útil)	Potencia térmica aprovechada durante la operación	Calor aprovechado en el proceso	kW	Cálculo basado en mediciones de energía	Sensor térmico, termocupla	Al finalizar cada ciclo operativo
Pérdidas térmicas	Proporción de energía térmica no aprovechada	Energía térmica perdida por ineficiencias	%-kW	Diferencia entre energía entrada y aprovechada	Calorímetro, termómetro, sensor de flujo	Después de cada ciclo

2.2.Métodos

Para la elaboración de este trabajo experimental se utilizaron los siguientes métodos:

2.2.1. Método experimental

El método experimental es un punto clave en la elaboración y estudio de este trabajo, este método permitió evaluar el comportamiento del prototipo de quemador bajo condiciones controladas. Se ejecutaron pruebas en las que se variaron parámetros como la presión del gas, el flujo de aire y la relación aire combustible. Con estas pruebas se obtuvieron datos reales sobre la eficiencia térmica del quemador, donde se midieron aspectos clave como la temperatura de combustión, las pérdidas de calor y la estabilidad de la llama.

2.2.2. Método bibliográfico

Este método se utilizó para fundamentar teóricamente la investigación con la información de libros, artículos científicos, normas técnicas y otros documentos especializados en combustión y energía. Con ello se recopiló información relevante sobre el funcionamiento de quemadores a gas y los factores que influyen en su funcionamiento.

2.2.3. Método cuantitativo

Este método permitió analizar de forma objetiva los datos que se va a obtener durante las pruebas experimentales. Cuando se realizaron las mediciones, se recopilaron datos numéricos que serán revisados y con estos se podrá calcular la eficiencia térmica del quemador, determinado la relación que hay entre el gas y la cantidad de calor generado.

2.2.4. Método cualitativo

Se aplicó un análisis cualitativo basado en la observación directa de las características de la llama producida por el quemador, tales como el color, la estabilidad y la forma de la llama en distintas configuraciones del sistema. Este método facilitó identificar comportamientos no cuantificables que afectan en la eficiencia de la combustión, como posibles zonas de inestabilidad o combustión incompleta. Estas observaciones se registraron en fichas descriptivas que permiten una comparación estructurada entre las

distintas pruebas realizadas y se complementara con el análisis cuantitativo.

2.2.5. Método analítico

El método analítico se empleó para examinar los principios físicos y termodinámicos que influyen en la eficiencia del quemador. En este método se estudiaron aspectos como la transferencia de calor, la combustión del gas y la interacción que existió entre el flujo de aire y la llama. Con este análisis se identificó las variables que más afecta el desempeño del quemador. Fue más fácil evaluar las pérdidas de calor y la detección de posibles mejoras en el diseño del quemador.

2.2.6. Método Comparativo

Se examinó el rendimiento del prototipo antes y después de modificar sus parámetros técnicos. Se recopiló los datos que tiene actualmente y comparar la eficiencia y el consumo de combustible. Así se pudo comparar el desempeño del quemador en diferentes configuraciones.

2.3.Procedimientos

2.3.1. Descripción del prototipo de quemador semi industrial

En este punto se da a conocer como está conformado el equipo que se va a someter a un análisis de oportunidades de mejora, es por esto por lo que se presenta la siguiente ficha técnica, (Ver tabla VIII) para ver la ficha completa ver el anexo C1.

Tabla VIII Resumen de ficha técnica

Combustible	GLP	Entrada de aire	comprimido
Longitud	972 mm	Presión de gas	0.5 psi
Altura desde la base	548 mm	Presión de aire	1 psi
Ancho	432 mm		
COMPONENTES			
Válvula para gas		Válvula para aire	
Base		Cilindro exterior	
Vidrio templado		Cilindro interior	

Inyector GLP	Acople hembra tubular
Disyunción	Anillo de refuerzo

Este quemador consta de un solo sistema para su funcionamiento que es el de aire-combustible, esta mezcla es expulsada por los inyectores generando la llama.

Para regular la presión del combustible (GLP) se utilizó un manómetro para baja presión, aunque ya que se varió a una presión mayor a la establecida se utilizó un manómetro de alta presión que son con los que se cuenta en el laboratorio de la facultad.

Tabla IX Manómetros de baja y alta presión

Equipo	Manómetro para alta presión
	0 a 180 psi (12 bar)
Equipo	Manómetro para baja presión
	0 a 4 bar (58.2 psi)

2.3.2. Recolección de datos de temperatura superficiales

Las mediciones realizadas están sujetas a la precisión de los instrumentos utilizados, tales como la cámara termográfica, termocupla y anemómetro. Aunque no se

desarrolló un análisis estadístico completo de incertidumbre, los equipos empleados presentan errores típicos inferiores al $\pm 2\%$, lo cual se considera aceptable para un estudio experimental de carácter comparativo. Dado que todas las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas y repetibles, las tendencias observadas en la eficiencia y pérdidas térmicas se consideran confiables.

La medición y el análisis de temperaturas presentadas en el quemador a gas semi industrial se lo realizó con una cámara termográfica del modelo FLIR E8-XT, estos infrarrojos, imagen dentro de imagen, fusión térmica y cámara digital.



Fig. 10 Equipo FLIR E8-XT

La medición de temperatura con la cámara termográfica se lo realizó a una distancia de 1 metro desde el piso hasta la lente de la cámara y 1 metro desde la lente de la cámara hasta el cuerpo del quemador.

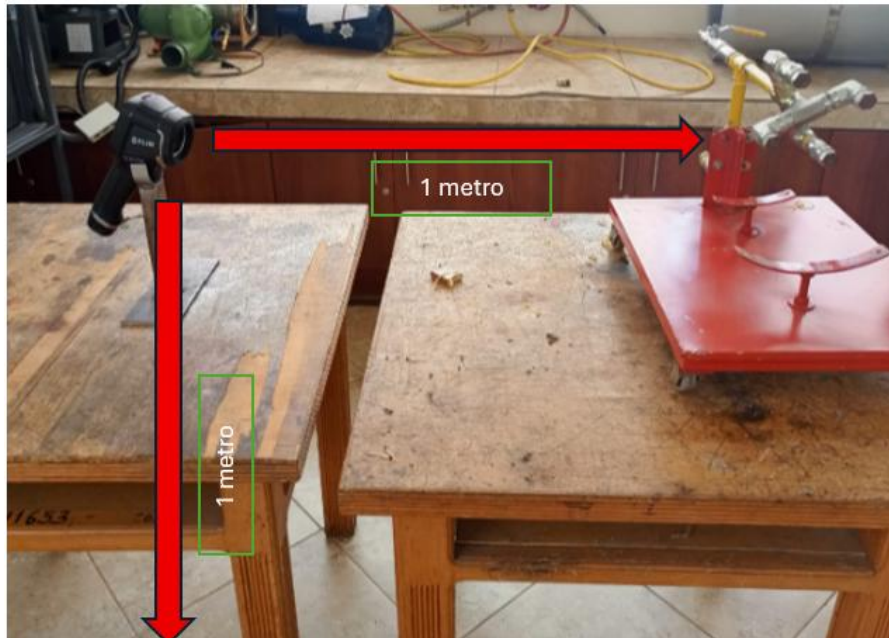


Fig. 11 Ubicación de la cámara termográfica

2.3.3. Recolección de datos de temperatura del aire

La medición del calor generado se realizó con una termocupla de la marca testo 735, el sensor de la termocupla permitió recopilar los datos del flujo térmico generado por el quemador en el proceso de combustión. Los datos se reflejan en grados centígrados, este dispositivo conta de 2 sensores de medición de temperatura.



Fig. 12 Termocupla Sesko

La colocación del sensor de la termocupla fue a unos 10 cm desde la boca del cilindro

de fuego, se colocó a esta distancia porque el sensor es muy pequeño y a una mayor distancia podría enfriarse el calor generado y obtendríamos datos erróneos.

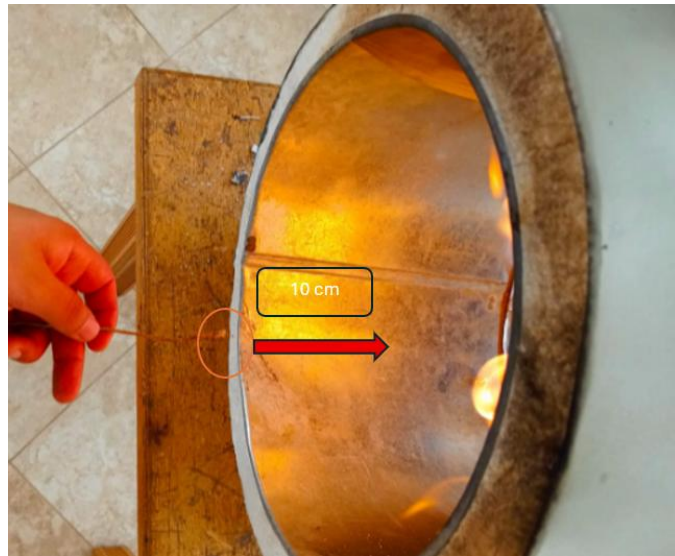


Fig. 13 Colocación del sensor de la termocupla

2.3.4. Recolección de datos de velocidad

Para la medición de la velocidad de salida del gas se utilizó un anemómetro de alta sensibilidad de la marca PEAKMETER PM625A. con la función Vel del anemómetro se pudo medir la velocidad con el aire que pasa a través del ventilador, los datos se muestran en unidades de metros sobre segundos y su rango de alcance va de 0.1 a 30 m/s.



Fig. 14 Anemómetro

Se coloca el anemómetro a una distancia de 10 cm desde la salida del gas a una presión de 0.5 psi (3447.38 Pa).

2.4.Procedimiento para operar el quemador

Para la ejecución de cada una de las pruebas experimentales con el quemador y la obtención de datos se realizó con el siguiente procedimiento que se describe a continuación:

1) Actividades de preparación.

- Hay que asegurarnos que todas las válvulas de paso de gas estén cerradas para posteriormente conectar el GLP.
- Conectar el cilindro de gas a la línea de alimentación y abrir las válvulas de paso hacia el sistema.
- Acoplar la línea de suministro de gas al quemador, siempre asegurándose que no haya presencia de fugas que puedan derivar en accidentes.
- Encender siempre el quemador por el frente, ya que por la estructura del cilindro del prototipo si se lo enciende por la parte de atrás podría resultar en accidentes y quemaduras graves.

2) Encendido

- Ajustar el caudal de salida de gas, no utilizar presiones altas que pueda dañar el sistema, se recomienda una presión de 0.5 psi
- Abrir la válvula de paso de gas situada antes del regulador de presión.
- Abrir de forma pausada la válvula del prototipo
- Encender de forma manual la llama utilizando un papel o algo que no provoque meter la mano en el cilindro de fuego del quemador.

3) Apagado

- Cerrar en su totalidad la válvula del quemador y la válvula del medidor, no manipular la estructura del quemador debido a las altas temperaturas.
- Dejar que el prototipo se enfríe naturalmente antes de poder usarlo de nuevo.

4) Acciones de seguridad

- Hacer una limpieza exhaustiva antes del uso del prototipo, asegurándose que los inyectores estén limpios y no exista obstrucciones.
- Limpiar la línea de suministro del GLP para prevenir la presencia de restos como aceite o suciedad.

- Utilizar equipo de protección personal al momento de manipular el equipo como guantes, mandil y gafas.
- Asegurarse de que exista una buena conexión de gas GLP para evitar presencia de fugas o agujeros en la manguera.

2.5.Etapas del proyecto

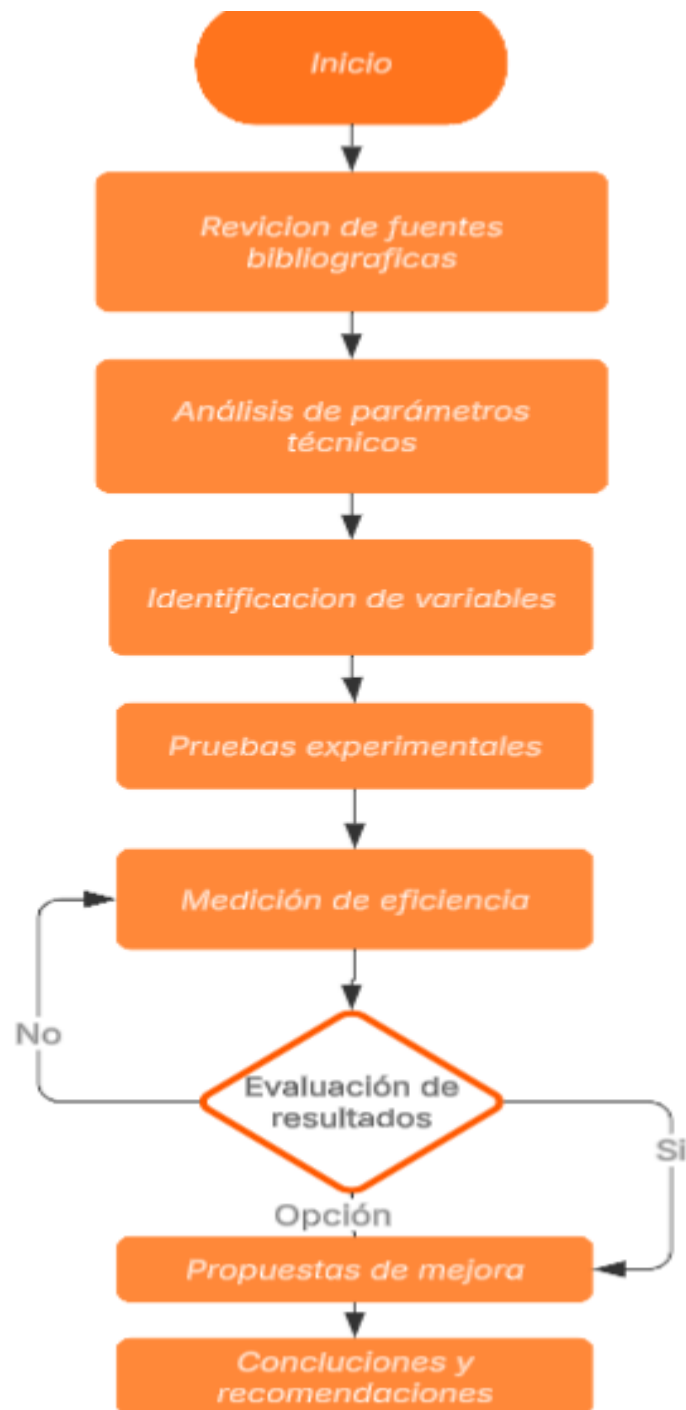


Fig. 15 Flujo de procesos del proyecto

2.6.Calculo térmico

2.6.1. Combustión sin mezclador, 4 inyectores y con presión de gas de 3447.38 Pa (0.5 psi)

2.6.1.1.Pérdidas de calor por convección natural

Para proceder con el cálculo de pérdidas por convección, se debe calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección y para esto tenemos:

Como datos tenemos $T_s = 82^\circ\text{C}$ y $T_\infty = 25^\circ\text{C}$, con estas temperaturas se calcula la temperatura de película promedio y tenemos la siguiente expresión:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad \text{Ec. 2.1.1}$$

Donde:

T_f :Temperatura promedio de película ($^\circ\text{C}$)

T_s :Temperatura superficial ($^\circ\text{C}$)

T_∞ :Temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$)

Datos:

$$T_s = 82^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 25^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

$$T_f = 53^\circ\text{C}$$

Tomando en cuenta que la presión aproximada a la que se encuentra la ciudad de Ambato es de 1.018 atm y teniendo la temperatura de película promedio de $T_f = 53^\circ\text{C}$ se puede obtener datos como la conductividad térmica (k), viscosidad (ν) y numero de Prandtl (Pr), estos valores los obtenemos interpolando en la tabla del anexo A-1:

$$k = 0.027569\text{W}/\text{m}^\circ\text{K}$$

$$\nu = 1.8274 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0.72202$$

Los datos se obtienen del Anexo A-1, calculamos el número de Reynolds.

Datos:

$$V = 0.8 \text{ m/s}$$

$$D = 0.4 \text{ m}$$

$$\nu = 1.8274 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad \text{Ec. 2.1.2}$$

Donde:

Re : Reynolds

V : Velocidad (m/s)

D : Diametro (m)

ν : Viscosidad cinemática (m^2/s)

$$Re = \frac{V * D}{\nu}$$

$$Re = 17511.2181$$

Con Reynolds y Prandtl calculamos el número de Nusselt que tiene la siguiente expresión:

Datos:

$$Re = 18539.976$$

$$Pr = 0.72202$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} * \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} \quad \text{Ec. 2.1.3}$$

$$Nu = 74.29$$

Una vez obtenido las variables pasamos a calcular el coeficiente de convección:

$$h_{conv} = \frac{k * Nu}{D} \quad Ec.2.1.4$$

Donde:

h_{conv} : Coeficiente de transferencia de calor por convección. $\left(\frac{W}{^{\circ}Km^2}\right)$

k : Conductividad térmica. (W/m $^{\circ}$ K)

Nu : Número de Nusselt.

D : Diámetro. (m)

Datos:

$$k = 0.027569 W/m^{\circ}K$$

$$Nu = 74.29$$

$$D = 0.4 \text{ m}$$

$$h_{conv} = \frac{k * Nu}{D}$$

$$h_{conv} = 5.12 W/^{\circ}Km^2$$

- Resistencia por convección

$$A = 2\pi r l \quad Ec.2.1.5$$

$$A = 0.75 m^2$$

$$R_{con} = \frac{1}{h * A} \quad Ec.2.1.6$$

$$R_{con} = 0.26 \frac{^{\circ}K}{W}$$

2.6.1.2. Pérdidas de calor por radiación

Se tiene la siguiente expresión:

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_a) * (T_s^2 + T_a^2) \quad \text{Ec.2.1.7}$$

Donde:

h_r : Coeficiente de transferencia de calor por radiación $\left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K\right)$

ε : Emisividad

σ : Constante de Stefan-Boltzmann $\left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K^4\right)$

T_s : Temperatura superficial ($^\circ K$)

T_a : Temperatura ambiente

Datos:

$\varepsilon = 0.7$ para acero

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ K^4$

$T_s = 82^\circ C = 355.15 \text{ } ^\circ K$

$T_a = 25^\circ C = 298.15 \text{ } ^\circ K$

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_a) * (T_s^2 + T_a^2)$$

$$h_r = 5.58 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ K$$

Ahora, para calcular el coeficiente combinado de transferencia de calor, se determina el coeficiente de calor por convección y el coeficiente de transferencia de calor por radiación, para lo cual se utiliza la siguiente expresión:

$$h_{comb} = h_{conv} + h_{rad} \quad \text{Ec.2.1.8}$$

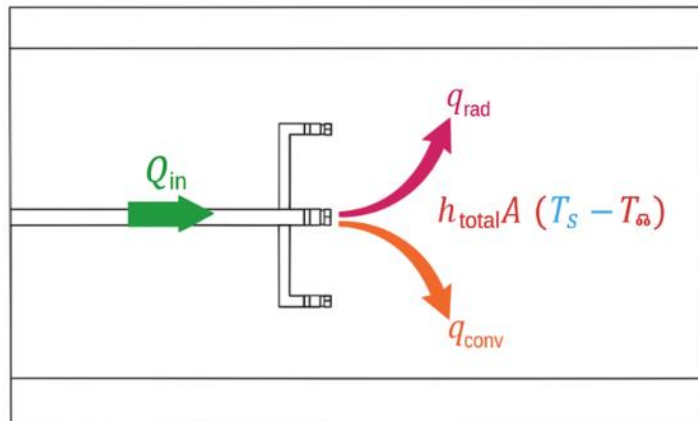


Fig. 16 Sumatoria coeficientes de perdidas por convección y radiación

Donde:

$h_{combinado}$: Coeficiente combinado de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K\right)$

h_{conv} : Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K\right)$

h_r : Coeficiente de transferencia de calor por radiación $\left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K\right)$

Datos:

$$h_{conv} = 5.12 \left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K\right)$$

$$h_r = 5.58 \left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K\right)$$

$$h_{comb} = h_{conv} + h_{rad}$$

$$h_{combinado} = 10.7 \left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K\right)$$

Para obtener la transferencia total de calor utilizamos la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{con} = h_{combinado} * A * (T_s - T_a) \quad \text{Ec.2.1.9}$$

Donde:

$\dot{Q}_{con}$: Transferencia total de convección (W)

$h_{combinado}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ K\right)$

A: Área de la superficie m^2

T_s : Temperatura superficial (°K)

T_a : Temperatura ambiente (°K)

Datos:

$$h_{combinado} = 2.703 \left(\frac{W}{m^2} \text{°K} \right)$$

$$A = 0.75 \text{ m}^2$$

$$T_s = 82^\circ\text{C} = 355.15 \text{ °K}$$

$$T_a = 25^\circ\text{C} = 293.15 \text{ °K}$$

$$\dot{Q}_{total} = h_{combinado} * A * (T_s - T_a)$$

$$\dot{Q}_{total} = 497.55 \text{ W}$$

2.6.1.3. Pérdidas por inquemados sólidos

El índice de Bacharach va dado por la Tabla I, ahí se detalla los valores dependiendo de las pérdidas por inquemados sólidos visibles durante el funcionamiento del prototipo, ya que al momento de realizar la prueba se evidenció generación considerable de hollín al factor B se le otorgó un valor de 3.

Datos:

$$B = 3$$

$$P = 0.4 * B^2 + 0.8B + 0.07 \quad \text{Ec.2.1.10}$$

Donde:

B: Índice de Bacharach

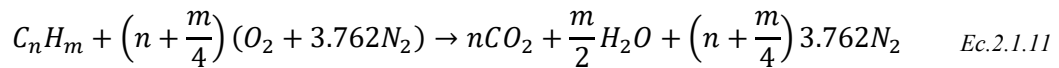
$$P = 0.4 * B^2 + 0.8B + 0.07$$

$$P = 6.07 \%$$

2.6.1.4. Calor de reacción de combustión

Para efectuar los cálculos de combustión hay que iniciar realizando balances estequiométricos considerando exceso de aire de 20% que es el porcentaje usual para quemadores de este tipo, para esto utilizaremos el propano (C_3H_8) ya que este representa la mayor cantidad de mezcla en el combustible GLP.

- La ecuación estequiométrica completa es la siguiente:



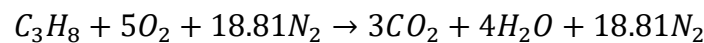
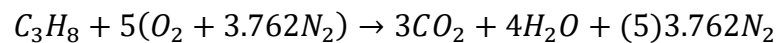
Donde:

C_nH_m : Hidrocarburos de composición general (C_3H_8)Combustible GLP

n : Numero de átomos de carbono

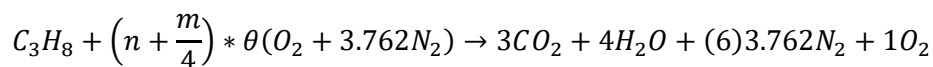
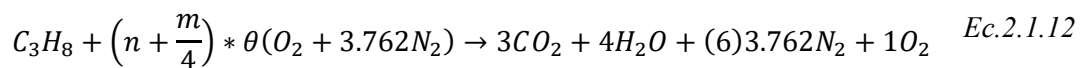
m : Numero de átomos de Hidrogeno

- Ecuación balanceada



- Combustión con exceso de aire de 20%

θ = exceso de aire 1.2



- Ecuación Balanceada



2.6.1.5.Cálculos de la entalpia de combustión

$$\bar{h}_c = \sum N_p \bar{h}^o_{f,p} - \sum N_r \bar{h}^o_{f,r} \quad Ec.2.1.13$$

Donde:

$\bar{h}_c$: Entalpia de combustión (kJ/Kmol)

N_p : Moles de los productos

$\bar{h}_{f,p}^o$: Entalpia de formación de los productos (kJ/Kmol)

N_r : Moles de los reactivos (kmol)

$\bar{h}_{f,r}^o$: Entalpia de formación de los reactivos (kJ/Kmol)



Tabla X Entalpia de combustión sistema sin mezclador y 4 inyectores

Sustancia	Estado	$\bar{h}_{f,r}^o(288.15)$	N (moles)	$\bar{h}_{f,p}^o * N$
C_3H_8	Reactivo	-10 385.00	1	-10 385.00
O_2	Reactivo	8 388.798	6	50 332.79
N_2	Reactivo	8 378.165	22.572	189 111.94
$\sum$ Reactivos				229 059.73
Sustancia	Estado	$\bar{h}_{f,r}^o(766.15)$	N (moles)	$\bar{h}_{f,p}^o * N$
CO_2	Producto	26 440.40	3	79 321.20
H_2O	Producto	26 587.80	4	106 351.20
N_2	Producto	22 647.20	22.572	511 192.60
O_2	Producto	23 379.00	1	23 379
$\sum$ Productos				720 244.00

$$\bar{h}_c = H_{prod} - H_{react} \quad Ec.2.1.14$$

$$\bar{h}_c = \sum N_p \bar{h}_{f,p}^o - \sum N_r \bar{h}_{f,r}^o$$

$$\bar{h}_c = 491184.27 \frac{kJ}{Kmol} C_3H_8$$

Al tener un valor de $\bar{h}_c > 0$, nos indica que la reacción es de tipo endotérmica, esto nos indica que existe más energía en los productos que en los reactivos.

2.6.1.6.Cálculo del calor teórico generado por la reacción de combustión

$$Q_{sal} + \sum N_p(\bar{h}^o_f + \bar{h} - \bar{h}^o)p = \sum N_r(\bar{h}^o_f + \bar{h} - \bar{h}^o)r \quad Ec.2.1.15$$

Donde:

Q_{sal} : Flujo de calor teórico generado (kJ/Kg)

N_p : Moles de los productos (kmol)

N_r : Moles de los reactivos (kmol)

$\bar{h}^o_f$:Entalpia de deformación a 25 °C y 1 atm (kJ/mol)

$\bar{h}$: Entalpia de formación a temperatura de ingreso de reactivos (kJ/Kmol)

$\bar{h}$: Entalpia de formación a temperatura de salida de productos (kJ/Kmol)

$\bar{h}^o$:Entalpia de corrección (kJ/Kmol)

E_{comb} : energía de combustión (kJ/Kg)



Obtenemos los valores de las entalpias $\bar{h}^o_f$ de el anexo A-2. Los valores de las entalpias de (O_2, N_2, CO_2, H_2O) a las temperaturas que se muestran se las obtienen al interpolar los valores de los anexos A-3, A-4, A-5, A-6 respectivamente, estos anexos son extraídos del libro de termodinámica octava edición de Yunus Cengel.

Tabla XI Entalpias de formación reactivos del sistema sin mezclador y 4 inyectores

Sustancia	N (kmol)	$\bar{h}^o_f$ (kJ/kmol)	$\bar{h}$ (288.15 °K) (kJ/kmol)	$\bar{h}^o$ (298.15 °K) (kJ/kmol)	$(h - h^o)$ (kJ/kmol)	Término (h^o_f + ($h - h^o$))	N * Término (kJ)
C_3H_8	1	-103850	-	-	0	-103850	-103850
O_2	6	0	8388.795	8686.05	-297.255	-297255	-1783.53
N_2	22.572	0	8378.165	8673.05	-294.885	-294885	-6656.14
Total	-	-	-	-	-	-	-112290

Tabla XII Entalpias de formación productos del sistema sin mezclador y 4 inyectores

Sustancia	N (kmol)	$\bar{h}_f^\circ$ (kJ/kmol)	$\bar{h}$ (298.15 °K) (kJ/kmol)	$\bar{h}^\circ$ (766.15 °K) (kJ/kmol)	$(h - h^\circ)$ (kJ/kmol)	Término $(h_f^\circ + (h - h^\circ))$	N * Término (kJ)
CO₂	3	-393520	9369.025	2644.04	17071.375	-376449.6	-1129345.7
H₂O	4	-241820	9908.65	26587.8	16679.15	-225140.9	-900563.7
N₂	22.572	0	8673.05	22647.2	13974.15	13974.15	315434.1
O₂	1	0	8686.05	2379	14692.95	14692.95	14692.95
Total	-	-	-	-	-	-	-1699792

$$Q_{sal} = \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) r - \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) p$$

$$Q_{sal} = 1594986.8 \frac{kJ}{Kmol} \text{ de } C_3H_8$$

$$Q_{sal} = \frac{1594986.8}{m_{comb}}$$

$$Q_{sal} = 36159.2 \frac{kJ}{Kg}$$

Para el flujo másico se utilizó el medidor del laboratorio de la carrera de ingeniería mecánica (ver anexo B4), el consumo del quemador se presenta como:

$$\frac{21lt}{120s} * \frac{2kg}{m^3} * \frac{m^3}{1000lt} = 0.00035kg/s$$

Con este flujo másico de gas se determina el calor teórico que genera el quemador

$$E_{comb} = \dot{m}_{GLP} * Q_{sal} \quad Ec.2.1.16$$

$$E_{comb} = 12.66 kW$$

2.6.1.7.Cálculo del flujo de calor del aire caliente generado por el quemador

Para poder calcular el calor que genera el quemador utilizaremos la ecuación de los gases ideales, incluyendo parámetros propios de la ciudad Ambato en la cual se hizo las pruebas para obtener algunos datos de la formula.

$$Ec.2.1.17$$

$$PAV = \dot{m}RT$$

Donde:

P: Presión (kPa)

$A_{efectiva}$: Área efectiva m^2

V : Velocidad $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\dot{m}$: Flujo masico (kg/s)

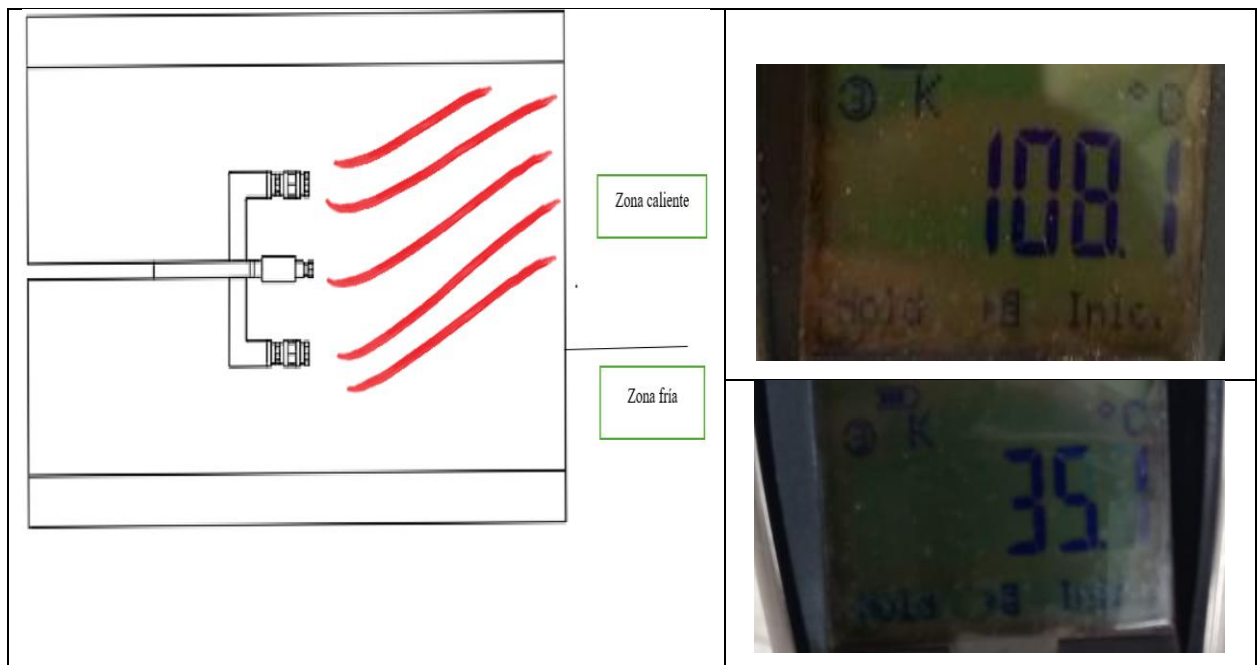
R : Constante de los gases ideales $0.287 \left(\frac{kPa \cdot m^3}{Kg \cdot ^\circ K}\right)$

T : Temperatura ($^\circ K$)

Para obtener la presión utilizaremos el anexo A-7, si sabemos que Ambato está a una altitud de 2500m.

Al momento de las pruebas experimentales en el prototipo y la medición del calor generado por el quemador se notó un comportamiento de la llama con una tendencia hacia arriba, por lo que el área efectiva del calor generado no es igual al diámetro del cilindro de fuego, para un mejor entendimiento se muestra el siguiente esquema:

Tabla XIII Esquema de distribución de calor



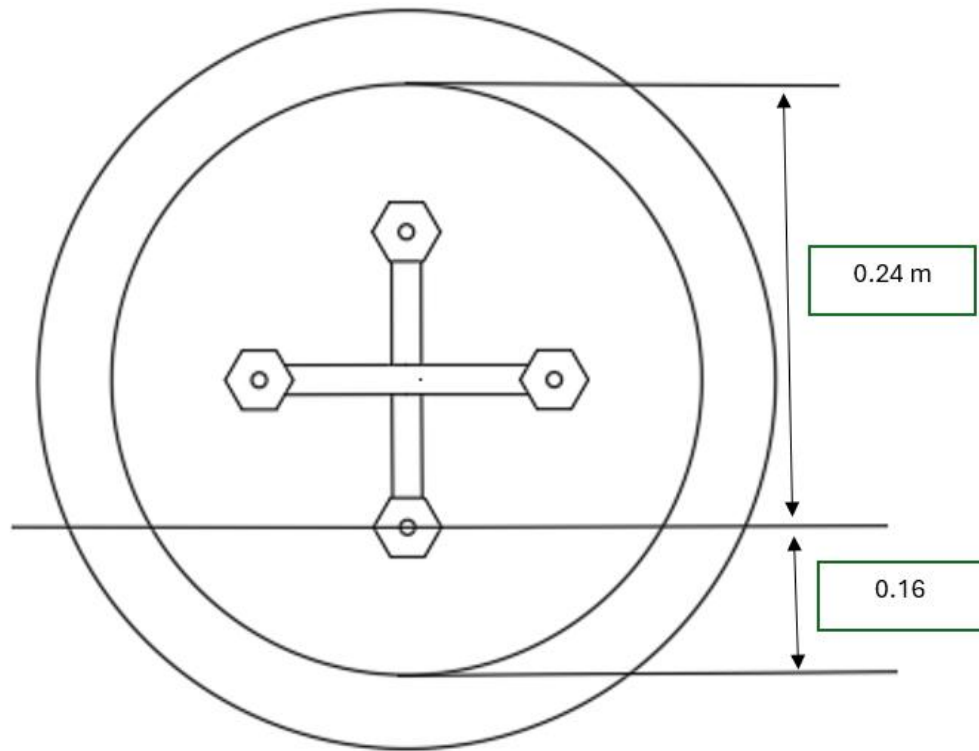


Fig. 17 Medida de la distribución del calor generado

Por lo tanto, la medida del diámetro efectivo sería igual a 0.24 m del cilindro de fuego del prototipo entonces calculamos:

Datos:

$$P=74.695 \text{ (kPa)}$$

$$V=0.8 \text{ (m/s)}$$

$$R= 0.287 \left(\frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$$

$$T= 381.25 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

$$r=0.12 \text{ m}$$

$$A = \pi * r^2$$

Ec.2.1.18

$$A = 0.045 \text{ m}^2$$

- **Cálculo del flujo másico**

$$\dot{m} = \frac{PAV}{RT}$$

$$\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$$

- **Flujo del aire caliente generado**

$$Q = \dot{m} * h \quad \text{Ec.2.1.19}$$

Donde:

h: entalpia a temperatura de funcionamiento (kJ/Kg)

Datos:

$$h = 382.034 \text{ (kJ/Kg)}$$

Esta entalpia se la consigue interpolando de los datos del anexo A-8.

$$Q = \dot{m} * h$$

$$Q = 9.55 \text{ KW}$$

2.6.1.8.Cálculo del flujo de calor del aire caliente que escapa por la parte posterior del quemador

Para poder determinar el calor que escapa por la parte posterior se utiliza la misma fórmula de los gases ideales y los mismos datos de la ciudad de Ambato

$$PAV = \dot{m}RT$$

Donde:

P: Presión (kPa)

$A_{efectiva}$: Área efectiva m^2

V: Velocidad $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\dot{m}$: Flujo masico (kg/s)

R: Constante de los gases ideales $0.287 \left(\frac{kPa*m^3}{Kg*^oK}\right)$

T: Temperatura (^oK)

Para obtener la presión utilizaremos el anexo A-7, si sabemos que Ambato está a una altitud de 2500m.

Datos:

$$P = 74.695 \text{ (KPa)}$$

$$V = 0.2 \text{ (m/s)}$$

$$R = 0.287 \left(\frac{kPa \cdot m^3}{Kg \cdot ^\circ K} \right)$$

$$T = 301.75 (^\circ K)$$

$$r = 0.16 \text{ m}$$

$$A = \pi * r^2$$

$$A = 0.08 \text{ m}^2$$

$$A_{efectiva} = A * 0.2$$

$$A_{efectiva} = 0.016 \text{ m}^2$$

- **Cálculo del flujo másico**

$$\dot{m} = \frac{PAV}{RT}$$

$$\dot{m} = 0.0028 \text{ kg/s}$$

- **Pérdida de calor del aire caliente por la parte posterior del quemador**

$$Q = \dot{m} * h$$

Donde:

h : Entalpia a temperatura de funcionamiento (kJ/Kg)

Datos:

$$h = 344.6 \text{ (KJ/Kg)}$$

Esta entalpia se la consigue interpolando de los datos del anexo A-8.

$$Q = \dot{m} * h$$

$$Q = 0.96 \text{ KW}$$

2.6.2. Combustión con mezclador, 8 inyectores y con presión de gas de 3447.38 Pa (0.5 psi)

2.6.2.1. Pérdidas de calor por convección natural

Para proceder con el cálculo de pérdidas por convección se parte de la misma manera que se estableció con anterioridad.

Como datos tenemos $T_s = 75^\circ C$ y $T_\infty = 25^\circ C$, con estas temperaturas calcularemos la temperatura de película promedio utilizamos la ecuación 2.1.1.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Datos:

$$T_s = 75^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 25^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

$$T_f = 50^\circ\text{C}$$

Ahora con la temperatura de película promedio obtenemos los datos como la conductividad térmica (k), viscosidad (ν) y número de Prandtl (Pr), estos valores los obtenemos interpolando en la tabla del anexo A-1:

$$k = 0.02735 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

$$\nu = 1.79810 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0.7228$$

Con los datos obtenidos del Anexo A-1, calculamos el número de Reynolds y se utiliza la ecuación 2.1.2.

Datos:

$$V = 0.8 \text{ m/s}$$

$$D = 0.4 \text{ m}$$

$$\nu = 1.79810 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = \frac{V * D}{\nu}$$

$$Re = \frac{V * D}{\nu}$$

$$Re = 16153.45$$

Con Reynolds y Prandtl calculamos el número de Nusselt y se utiliza la ecuación 2.1.3.:

Datos:

$$Re = 16153.45$$

$$Pr = 0.7228$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} * \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}}$$

$$Nu = 71.3913$$

Una vez obtenido las variables procedemos a calcular el coeficiente de convección con la ecuación 2.1.4:

$$h_{conv} = \frac{k * Nu}{D}$$

Datos:

$$k = 0.02735 W/m^{\circ}K$$

$$Nu = 71.3913$$

$$D = 0.4 \text{ m}$$

$$h_{conv} = \frac{k * Nu}{D}$$

$$h_{conv} = 4.94 W/^{\circ}Km^2$$

- Resistencia por convección

Se utiliza la ecuación 2.1.5.:

$$A = 2\pi r l$$

$$A = 0.75 m^2$$

Y la ecuación 2.1.6.:

$$R_{con} = \frac{1}{h * A}$$

$$R_{con} = 0.268 \frac{^{\circ}K}{W}$$

2.6.2.2. Pérdidas de calor por radiación

Coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r se lo calcula con la ecuación 2.1.7.

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_a) * (T_s^2 + T_a^2)$$

Datos:

$$\varepsilon = 0.7 \text{ para acero}$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

$$T_s = 75^\circ\text{C} = 348.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 293.15^\circ\text{K}$$

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_a) * (T_s^2 + T_a^2)$$

$$h_r = 5.389 \text{ W/m}^2\text{K}$$

De igual manera se determina el $h_{combinado}$ con una suma de los coeficientes de transferencia de calor por convección y el coeficiente de transferencia de calor por radiación con la ecuación 2.1.8.:

$$h_{comb} = h_{conv} + h_r$$

Datos:

$$h_{conv} = 4.94 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ }^\circ\text{K} \right)$$

$$h_r = 5.39 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ }^\circ\text{K} \right)$$

$$h_{comb} = h_{conv} + h_r$$

$$h_{combinado} = 10.33 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ }^\circ\text{K} \right)$$

Para obtener la transferencia total de calor utiliza la ecuación 2.1.9.:

$$\dot{Q}_{conv} = h_{combinado} * A * (T_s - T_a)$$

Datos:

$$h_{combinado} = 10.33 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ }^\circ\text{K} \right)$$

$$A = 0.75 \text{ m}^2$$

$$T_s = 75^\circ\text{C} = 348.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 293.15^\circ\text{K}$$

$$\dot{Q}_{conv} = h_{combinado} * A * (T_s - T_a)$$

$$\dot{Q}_{conv} = 426.11 \text{ W}$$

2.6.2.3. Pérdidas por inquemados sólidos

En las pruebas se evidencio una menor generación de hollín por lo que al factor B se le otorga un valor de 2.

Datos:

$$B = 2$$

Se calcula con la ecuación 2.1.10.

$$P = 0.4 * B^2 + 0.8B + 0.07$$

Donde:

B: Índice de Bacharach

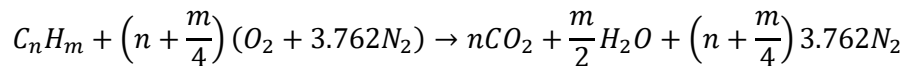
$$P = 0.4 * B^2 + 0.8B + 0.07$$

$$P = 3.27 \%$$

El índice de Bacharach se lo obtiene bajo un criterio de terminado en la Tabla 1

2.6.2.4. Calor de reacción de combustión

- La ecuación estequiométrica completa es la ecuación 2.1.11.:



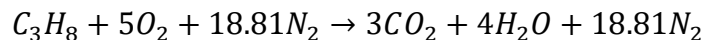
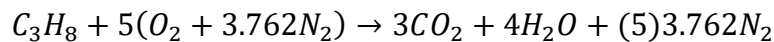
Donde:

C_nH_m : Hidrocarburos de composición general (C_3H_8) Combustible GLP

n: Numero de átomos de carbono

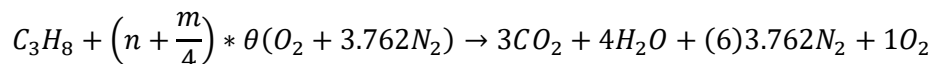
m: Numero de átomos de Hidrogeno

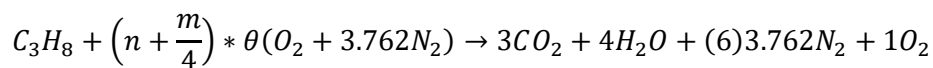
- Ecuación balanceada



- Combustión con exceso de aire de 20%

θ = exceso de aire 1.2





- Ecuación Balanceada



2.6.2.5. Cálculos de la entalpía de combustión

Va dado por la ecuación 2.1.13.

$$\bar{h}_c = \sum N_p \bar{h}_{f,p}^o - \sum N_r \bar{h}_{f,r}^o$$

Donde:

$\bar{h}_c$: Entalpía de combustión (kJ/Kmol)

N_p : Moles de los productos

$\bar{h}_{f,p}^o$: Entalpía de formación de los productos (kJ/Kmol)

N_r : Moles de los reactivos (kmol)

$\bar{h}_{f,r}^o$: Entalpía de formación de los reactivos (kJ/Kmol)



Tabla XIV Entalpía de combustión del sistema con mezclador y 8 inyectores

Sustancia	Estado	$\bar{h}_{f,r}^o(288.15)$	N (moles)	$\bar{h}_{f,p}^o * N$
C_3H_8	Reactivo	-10 385.00	1	-10 385.00
O_2	Reactivo	8 388.798	6	50 332.79
N_2	Reactivo	8 378.165	22.572	189 111.94
$\sum$ Reactivos				229 059.73
Sustancia	Estado	$\bar{h}_{f,r}^o(758.15)$	N (moles)	$\bar{h}_{f,p}^o * N$
CO_2	Producto	21891.39	3	65674.17
H_2O	Producto	26287.52	4	105150.08
N_2	Producto	22402.47	22.572	505668.55
O_2	Producto	23116.21	1	23116.21
$\sum$ Productos				699609.01

$$\bar{h}_c = H_{prod} - H_{react}$$

$$\bar{h}_c = \sum N_p \bar{h}_{f,p}^o - \sum N_r \bar{h}_{f,r}^o$$

$$\bar{h}_c = 63393.84 \frac{kJ}{kmol} C_3H_8$$

Igual que en el caso anterior tenemos que $\bar{h}_c > 0$, nos indica que la reacción es de tipo endotérmica, esto nos indica que existe más energía en los productos que en los reactivos.

2.6.2.6. Cálculo del calor teórico generado por la reacción de combustión

$$Q_{sal} + \sum N_p (\bar{h}_{f,p}^o + \bar{h} - \bar{h}^o) = \sum N_r (\bar{h}_{f,r}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)$$

Donde:

Q_{sal} : Flujo de calor teórico generado (kJ/Kg)

N_p : Moles de los productos (kmol)

N_r : Moles de los reactivos (kmol)

$\bar{h}_{f,p}^o$: Entalpia de deformación a 25 °C y 1 atm (kJ/mol)

$\bar{h}$: Entalpia de formación a temperatura de ingreso de reactivos (kJ/Kmol)

$\bar{h}$: Entalpia de formación a temperatura de salida de productos (kJ/Kmol)

$\bar{h}^o$: Entalpia de corrección (kJ/Kmol)

E_{comb} : Energía de combustión

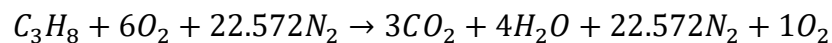


Tabla XV Entalpias de formación reactivos del sistema con mezclador y 8 inyectores

Sustancia	N (kmol)	$\bar{h}_{f,p}^o$ (kJ/kmol)	$\bar{h}$ (288.15 °K) (kJ/kmol)	$\bar{h}^o$ (298.15 °K) (kJ/kmol)	$(h - h^o)$ (kJ/kmol)	Término ($\bar{h}_{f,p}^o + (h - h^o)$)	N * Término (kJ)
C_3H_8	1	-103850	-	-	0	-103850	-103850
O_2	6	0	8388.795	8686.05	-297.255	-297255	-1783.53

N₂	22.572	0	8378.165	8673.05	-294.885	-294885	-6656.14
Total	-	-	-	-	-	-	-112290

Tabla XVI Entalpías de formación productos del sistema con mezclador y 8 inyectores

Sustancia	N (kmol)	$\bar{h}_f^\circ$ (kJ/kmol)	$\bar{h}$ (298.15 °K) (kJ/kmol)	$\bar{h}^\circ$ (758.15 °K) (kJ/kmol)	$(h - h^\circ)$ (kJ/kmol)	Término ($\bar{h}_f^\circ + (h - h^\circ)$)	N * Término (kJ)
CO₂	3	-393520	9369.025	21891.39	-380997.635	-380997.635	-1142992.905
H₂O	4	-241820	9908.65	26287.52	-225441.13	-225441.130	-901764.520
N₂	22.572	0	8673.05	22402.47	13729.42	13729.42	309900.468
O₂	1	0	8686.05	23116.21	14430.16	14430.16	14430.16
Total	-	-	-	-	-	-	-1720426.797

$$Q_{sal} = \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) - \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)p$$

$$Q_{sal} = 1720426.79 \frac{kJ}{kmol} \text{ de } C_3H_8$$

$$Q_{sal} = \frac{1720426.79}{m_{comb}}$$

$$Q_{sal} = 39016.36 \frac{kJ}{Kg}$$

Para el flujo másico se utilizó el medidor del laboratorio de la carrera de ingeniería mecánica, el consumo del quemador se presenta como:

$$\frac{20lt}{120s} * \frac{2kg}{m^3} * \frac{m^3}{1000lt} = 0.00033kg/s$$

Con este flujo másico de gas se determina el calor teórico que genera el quemador con la ecuación 2.1.16

$$E_{comb} = \dot{m}_{GLP} * Q_{sal}$$

$$E_{comb} = 12.87 kW$$

Tomando en cuenta que el mezclador tiene una capacidad de 90000 BTU/h lo que equivale a 26.38 KW tenemos que:

$$\frac{12.87}{26.38} * 100 = 48.79\%$$

Tenemos que se utilizó el 48.79% de la capacidad del mezclador

2.6.2.7. Cálculo del flujo de calor del aire caliente generado por el quemador

De la misma manera tenemos que el calor generado por el quemador no ocupa toda el área de la boca del quemador ya que el aire caliente tiende a elevarse por lo que se representa de la siguiente manera:

Tabla XVII Esquema de distribución del calor en el sistema con 8 inyectores

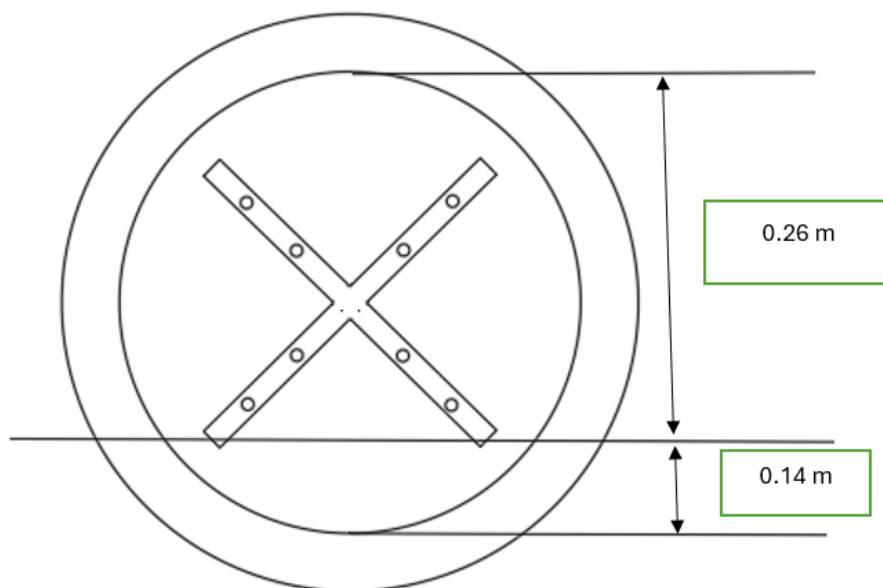


Fig. 18 Medida de distribución 2

Por lo que el área efectiva de este caso es de 0.26 m de la boca del cilindro de fuego.

Ahora aplicamos la ecuación 2.1.17 de los gases ideales con datos de la ciudad de Ambato y obtenemos:

$$PAV = \dot{m}RT$$

Para obtener la presión utilizaremos el anexo A-7, si sabemos que Ambato está a una altitud de 2500m.

Datos:

$$P=74.695 \text{ (KPa)}$$

$$V=0.8 \text{ (m/s)}$$

$$R= 0.287 \left(\frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$$

$$T= 377.06 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

$$r=0.13 \text{ m}$$

$$A = \pi * r^2$$

$$A = 0.053 \text{ m}^2$$

- **Cálculo del flujo másico**

$$\dot{m} = \frac{PAV}{RT}$$

$$\dot{m} = 0.029 \text{ kg/s}$$

- **Flujo del aire caliente generado**

$$Q = \dot{m} * h$$

Donde:

h: entalpia a temperatura de funcionamiento (KJ/Kg)

Datos:

$$h= 377.83 \text{ (KJ/Kg)}$$

Esta entalpia se la consigue interpolando de los datos del anexo A-8.

$$Q = \dot{m} * h$$

$$Q = 10.12 \text{ KW}$$

2.6.2.8.Cálculo del flujo de calor del aire caliente que escapa por la parte posterior del quemador

Para poder determinar el calor que escapa por la parte posterior utilizaremos la fórmula de gases ideales.

$$PAV = \dot{m}RT$$

Para obtener la presión utilizaremos el anexo A-7, si sabemos que Ambato está a una altitud de 2500m.

Datos:

$$P = 74.695 \text{ (kPa)}$$

$$V = 0.2 \text{ (m/s)}$$

$$R = 0.287 \left(\frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$$

$$T = 294.55 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

$$r = 0.16 \text{ m}$$

$$A = \pi * r^2$$

$$A = 0.08 \text{ m}^2$$

$$A_{efectiva} = A * 0.2$$

$$A_{efectiva} = 0.016 \text{ m}^2$$

- **Cálculo del flujo másico**

$$\dot{m} = \frac{PAV}{RT}$$

$$\dot{m} = 0.0029 \text{ kg/s}$$

- **Pérdida de calor del aire caliente por la parte posterior del quemador**

$$Q = \dot{m} * h$$

Donde:

h : Entalpia a temperatura de funcionamiento (kJ/Kg)

Datos:

$$h = 294.72 \text{ (kJ/Kg)}$$

Esta entalpia se la consigue interpolando de los datos del anexo A-8.

$$Q = \dot{m} * h$$

$$Q = 0.85 \text{ KW}$$

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. Análisis y discusión de resultados

Las variables que se analizaron son: la presión del gas que alimenta el equipo y el flujo de aire. Para ello, se incorporó un mezclador que facilitó el ajuste óptimo de la relación aire-combustible. Se realizaron pruebas experimentales que incluyeron evaluaciones operativas, análisis termográficos y estudio de la llama. Los hallazgos fueron favorables, demostrando un comportamiento estable y permitiendo identificar oportunidades de mejora para la eficiencia energética del quemador.

3.1.Representación de esquemas

Con la finalidad de entender de manera más clara las modificaciones realizadas en el prototipo de quemador a gas semi industrial, se elaboró tres esquemas representativos. En estos esquemas se puede apreciar de forma comparativa la estructura del quemador original y la configuración con los ajustes añadidos. Estos esquemas permiten visualizar los cambios estructurales y funcionales aplicados, tales como la adición de un mezclador de aire y cambios en la línea de inyección. Esta representación gráfica facilita la interpretación del desarrollo técnico y sustenta las decisiones tomadas durante el proceso de pruebas.

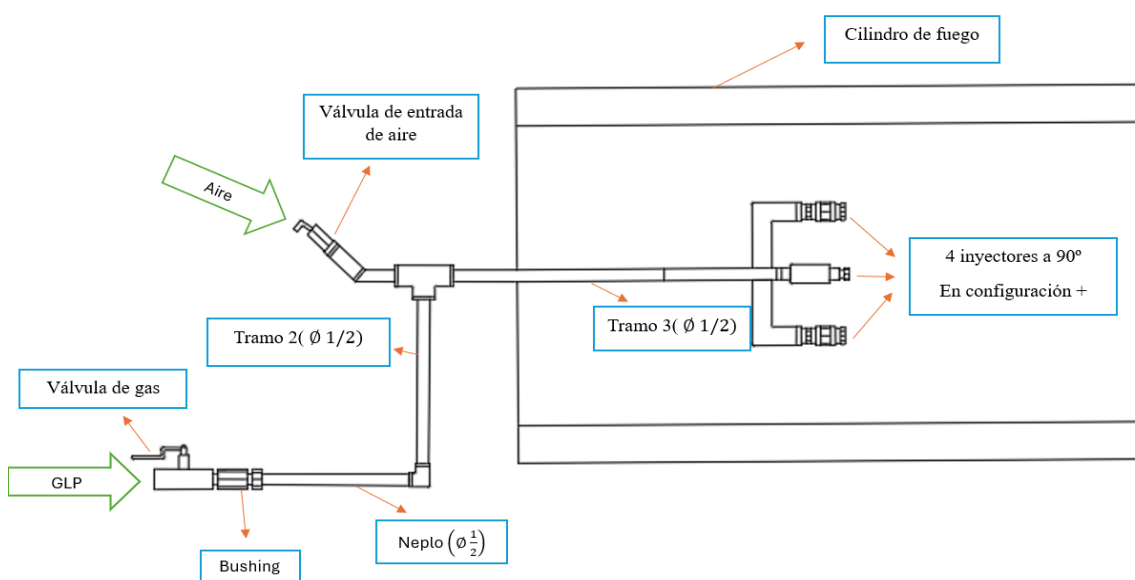


Fig. 19 Estructura original del quemador

Tras las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio, se determinó que la válvula mezcladora de aire–gas no operaba de manera adecuada con el sistema inicial, ya que no existía succión por los orificios del aire del mezclador. Además, se evidenció que la presencia de múltiples accesorios en la línea de conducción (codos, uniones y acoples) generaba pérdidas de carga adicionales y afectaba el desempeño óptimo del mezclador. Con el fin de mejorar la eficiencia del sistema, se decidió reubicar la línea de inyección de combustible hacia una configuración más directa, minimizando el uso de accesorios y reduciendo las restricciones al flujo. La representación esquemática de esta modificación se presenta a continuación:

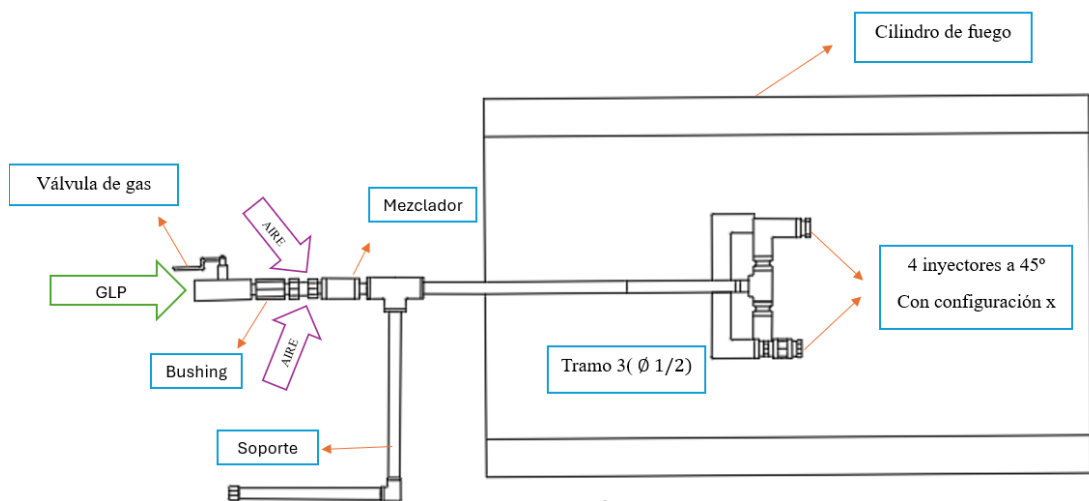


Fig. 20 Estructura con inyectores a 45°

Además, se decidió probar con una configuración de inyectores diferente, con 8 salidas para analizar el comportamiento de la llama con una salida más amplia y con mayor número de salidas para el combustible, a continuación, se presenta el esquema:

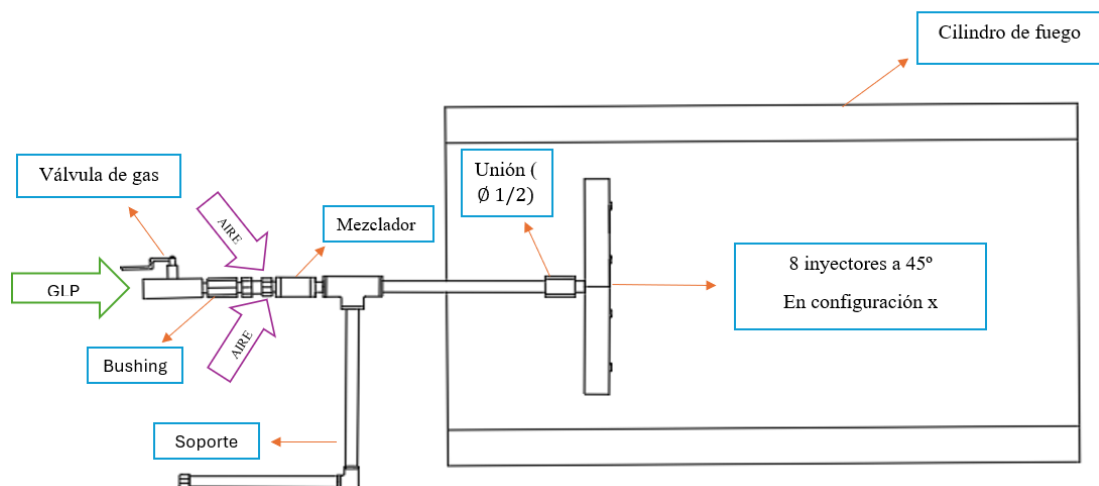


Fig. 21 Estructura con 8 inyectores

3.2. Parámetros físicos durante su operación en condiciones reales

Para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro del prototipo de quemador a gas semi industrial, se efectuó una evaluación de sus principales parámetros físicos. Estos incluyen características de operación térmica y consumo energético. La información fue recopilada mediante observación directa y medición con instrumentos durante pruebas controladas de funcionamiento. A continuación, se presenta los resultados obtenidos:

3.3. Análisis de oportunidades de mejora

El resultado de las pruebas experimentales con el prototipo de quemador se identificaron oportunidades de mejora que optimizan su rendimiento térmico y eficiencia operativa. Estas propuestas se fundamentan en un doble enfoque que incluyó una comparación cualitativa, que va centrada en la observación del comportamiento de la llama, su estabilidad, color y forma, y una comparación cuantitativa, que buscó parámetros técnicos medibles como el calor que se genera, las pérdidas que se producen, consumo y presión del combustible y un análisis térmico superficial mediante termografía infrarroja.

3.3.1. Análisis cuantitativo

Durante las pruebas se recabaron datos numéricos de dos sistemas, del sistema a 0.5 psi con 4 inyectores en configuración + y del sistema a 0.5 psi con 8 inyectores en configuración x, esto debido a que el sistema a 4 psi no permitía la medición de datos por sus condiciones descontroladas y riesgosas, y el sistema a 0.5 psi con 4 inyectores no funcionaba de forma correcta se decidió no medir datos de estos dos sistemas, los datos recabados se muestran a continuación:

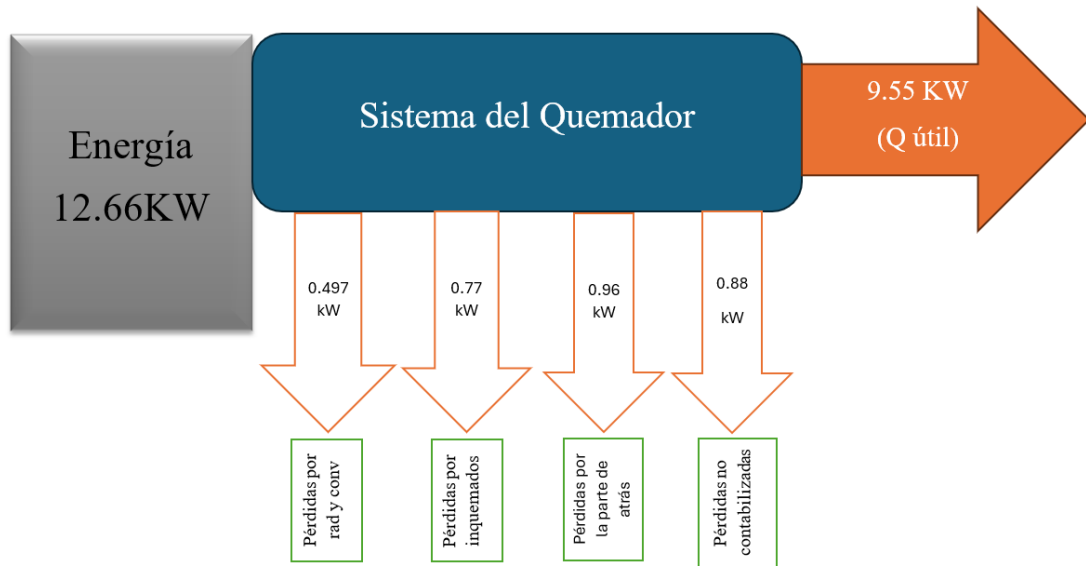


Fig. 22 Diagrama de pérdidas y calor útil del sistema sin mezclador

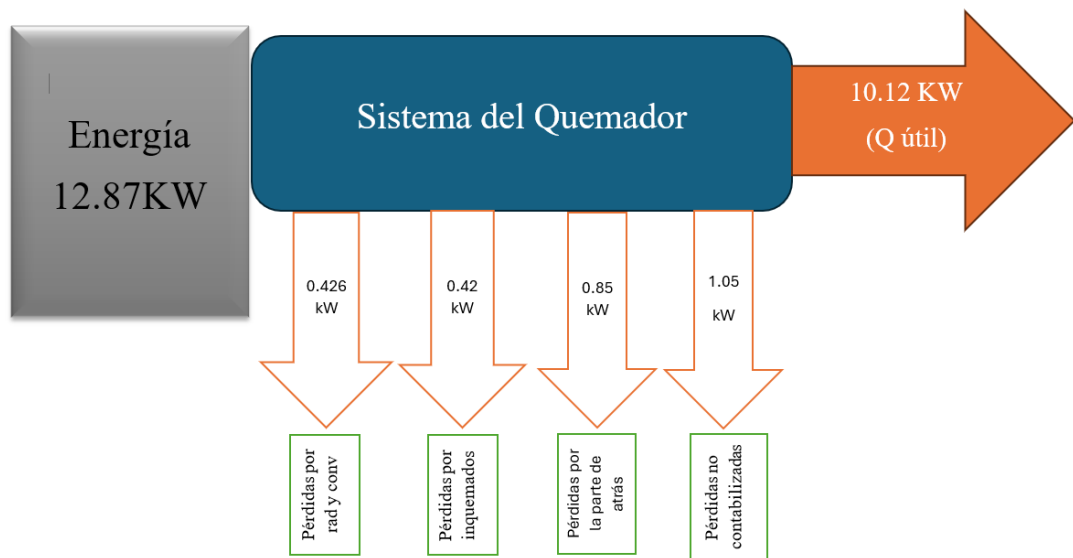


Fig. 23 Diagrama de pérdidas y calor útil del sistema con mezclador

a) Cálculo del rendimiento para el sistema sin mezclador a 0.5 psi con 4 inyectores en configuración +

Para el cálculo de la eficiencia tomamos los datos calculados del calor generado por el sistema y el calor teórico que genera, con estos datos tenemos que aplicar la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{entra}}} \times 100 \quad \text{Ec.3.1.}$$

Datos:

$$Q = 9.55 \text{ KW}$$

$$\dot{Q} = 12.66 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{9.55}{12.66} \times 100$$

$$\eta = 75.43\%$$

b) Cálculo del rendimiento para el sistema con mezclador a 0.5 psi con 8 inyectores en configuración x

$$Q = 10.12 \text{ KW}$$

$$\dot{Q} = 12.87 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{10.12}{12.87} \times 100$$

$$\eta = 78.63\%$$

3.3.2. Análisis cualitativo

a) Características de la flama

Durante las pruebas realizadas sobre el prototipo de quemador semi industrial, se identificó un comportamiento diferente entre las condiciones de operación a distintas presiones y configuraciones de mezcla aire-gas. Los resultados permitieron identificar una influencia directa de la presión de suministro y la incorporación del mezclador en la distribución de temperatura superficial y la cantidad de calor útil generado. A continuación, se presenta un cuadro donde se compara los distintos aspectos obtenidos en las pruebas además de imágenes que ayudan a visualizar dichas diferencias:

Tabla XVIII Imagen de cada parámetro de operación

0.5 psi sin mezclador, 4 inyectores y con configuración en +	4 psi sin mezclador, 4 inyectores y con configuración en +
0.5 psi con mezclador, 4 inyectores y con configuración en x	0.5 con mezclador, 8 inyectores y configuración en x

A continuación, se presenta un cuadro donde se compara las características cualitativas obtenidas durante las pruebas:

Tabla XIX Comparación cualitativa

Característica	Parámetros de operación			
	4 psi sin mezclador	0.5 psi sin mezclador	0.5 con mezclador (4 inyectores)	0.5 psi con mezclador (con 8 inyectores)
Estabilidad de la flama	Inestable, grandes variaciones	Moderado con ligeras fluctuaciones	Mayormente estable	Estable, con picos leves al final
Forma	Irregular alargada	Alargada	Medianamente alargada	Medianamente alargada

Coloración	Transparente, con tonalidades azul y anaranjado	Tonalidades azules y amarillas	Tonalidades azules y amarillas	Tonalidades azules y anaranjada
Ruido	Alto	Medio alto	Medio bajo	Silenciosa
Longitud	Larga	Media	Media	Corta
Turbulencia	Muy turbulento	Medio turbulento	Poco turbulento	Sin oscilaciones marcadas

Análisis: Al someter al sistema a media presión (4 psi) sin mezclador y 4 inyectores, mostró el peor desempeño, una fuerte turbulencia, ruido elevado y una forma alargada y desordenada, lo que puede resultar en daños en el sistema y alta peligrosidad para los usuarios.

Si se somete al sistema a una presión más baja (0.5 psi) sin mezclador y 4 inyectores, la flama mejora ligeramente en estabilidad, pero aun presenta fluctuaciones, una coloración con tonos azules más visibles y una turbulencia moderada lo que indica que la mezcla aire -gas no es óptima.

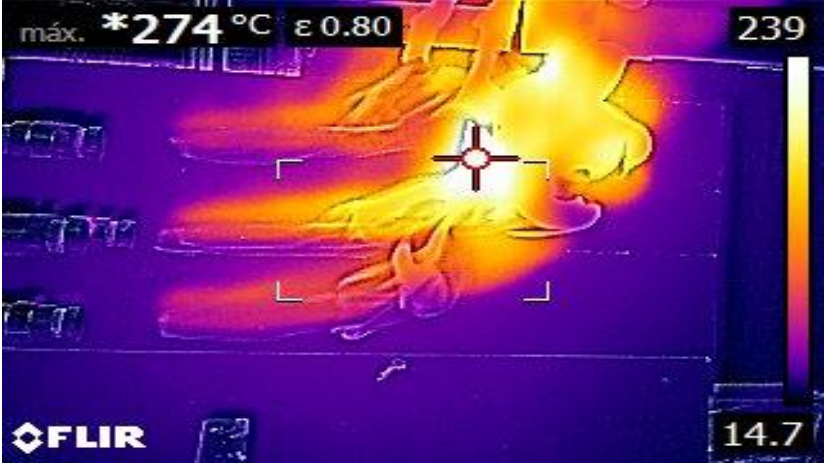
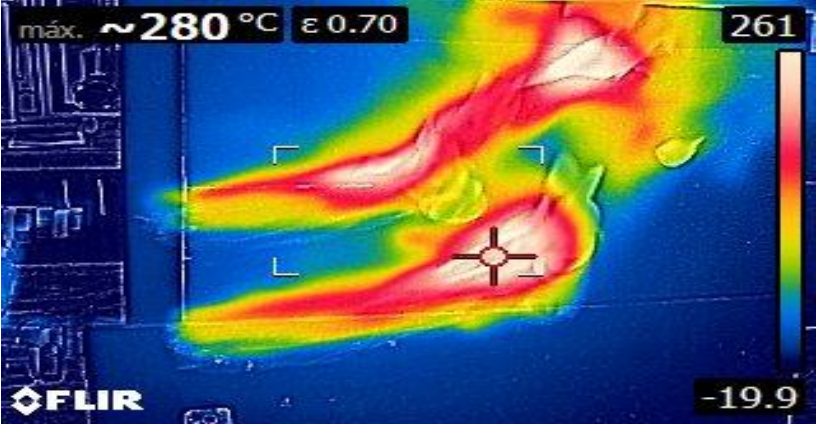
Al incorporar a esta misma presión y con 4 inyectores, la flama se vuelve más estable, con menor turbulencia y menor ruido, mostrando una relación aire combustible más homogénea, pero si añadimos un inyector de 8 salidas presenta un mejor comportamiento, estable y silenciosa, menos turbulencias, mostrando una mejor distribución de aire-gas más uniforme y eficiente.

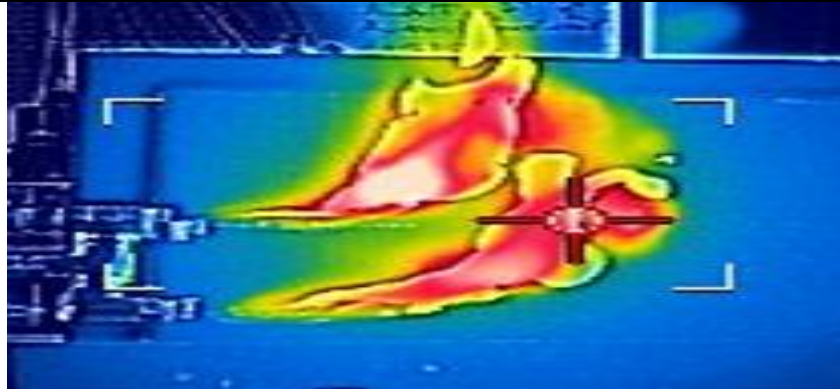
b) Consumo de combustible

Al evaluar el consumo de combustible (GLP) con presión de 0.5 Psi, para un periodo de tiempo de 2 minutos con el objetivo de identificar el impacto que tiene la incorporación de un accesorio de premezcla se determinó que el sistema sin mezclador consumió un total de 21 litros de GLP en 2 minutos y con mezclador y 4 inyectores un consumo de 30 litros de GLP en el mismo tiempo. Si se incluye un inyector con 8 orificios de salida el sistema presento un consumo de 20 litros de GLP en 2 minutos. Al tener una salida más libre el mezclador de aire combustible trabaja eficientemente y permite un consumo menor de combustible.

c) Aplicación de termografía infrarroja

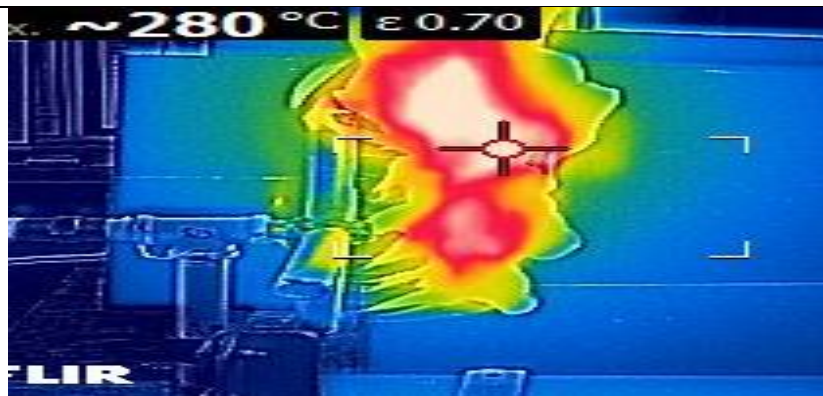
Tabla XX Termografía de cada parámetro de operación

1) 0.5 psi sin mezclador, 4 inyectores y con configuración en +

La zona se presenta alargada y extendida, un patrón irregular que ocupa un área amplia tiene regiones calientes separadas, que indica una baja concentración de calor. Una llama inclinada y asimétrica, lo que sugiere una inestabilidad en la combustión.
2) 4 psi sin mezclador, 4 inyectores y con configuración en +

La zona de la flama presenta una forma muy alargada y extendida con patrones irregulares, zonas dispersas con regiones calientes separadas y asimétrica.
3) 0.5 psi con mezclador, 4 inyectores y con configuración en x



El patrón de la flama es más compacto y concentrado alrededor del punto de combustión, se reduce áreas dispersas y se concentra el calor en una región definida, la flama muestra una estructura más vertical y bordes más definidos.

4) 0.5 con mezclador, 8 inyectores y configuración en x



La zona caliente es muy concentrada y más simétrica, pese a no tener un área total grande, la concentración de calor es notablemente mayor, una forma vertical y angosta con pocas variaciones lo que indica una mayor estabilidad y mínima turbulencia.

d) Flujo de aire

El flujo de aire en un sistema de combustión cumple una tarea muy importante, este influye de forma directa en la mezcla aire-combustible, la distribución de calor y la estabilidad de la flama. El prototipo presenta las siguientes características:

Al someter al sistema a una presión elevada de 4 psi, el gas ingresa con una alta velocidad de salida, lo que genera un efecto de arrastre de aire primario que es insuficiente para mantener la proporción estequiométrica. El flujo de aire secundario no logra compensar esta deficiencia lo que provoca una mezcla mayormente de

combustible. Lo que provoca turbulencias, color amarillento y ruido excesivo, síntomas de una combustión incompleta.

Al disminuir la presión del gas a 0.5 psi el flujo de aire mejoro levemente. Sin embargo, el aire se añade después de los inyectores, es decir, se mezcla una vez sale el GLP de los inyectores por lo que el aire y el combustible no se mezclan homogéneamente.

Mejora a comparación del sistema a una presión de 4 psi, pero al no tener una mezcla eficiente el sistema presenta sectores irregulares y oscilantes que reflejan la falta de aire lo que resulta en una transferencia de calor menos uniforme, reduciendo la eficiencia térmica.

Al incorporar un mezclador a la línea de alimentación del combustible se garantiza una premezcla que mejoraría con gran notoriedad el estado de la llama del sistema, sin embargo al incluirlo en el quemador se evidenció un retorno parcial de la mezcla que salía por los orificios de succión del mezclador, al no tener una salida libre de la mezcla no se logra un flujo de GLP y oxígeno que se necesita, a pesar de una pequeña mejora en el funcionamiento, existía pérdida del combustible, lo que se vería reflejado en pérdidas económicas y térmicas.

Por esta razón se decidió implementar un inyector con 8 orificios, los resultados fueron evidentes, la salida de la mezcla era libre lo que generó que el mezclador trabaje de forma óptima, el flujo de aire y el gas se combinan antes del ingreso a él inyector, lo que produce una mezcla homogénea y una distribución equilibrada de presión y velocidad. El flujo resultante es laminar y estable, reduciendo la turbulencia dentro del sistema y permitiendo una combustión más completa y controlada.

Además de estas pruebas se decidió intentar incorporar un ventilador en la parte posterior del quemador, el flujo de aire fue forzado sin control sobre su distribución interna. Aunque se incrementó la velocidad del aire, uno de los cuatro inyectores se apagaba cada vez que se encendía el flujo de aire, lo que indica una mala distribución y sobrepresión localizada. Esta situación compromete la estabilidad de la combustión y genera ineficiencia operativa, además de riesgos por el posible escape de gas sin quemar.

3.4. Validación de la hipótesis

3.4.2. Hipótesis

El análisis de variables técnicas como la presión de gas, el flujo de aire en un prototipo de quemador semi industrial permitirá mejorar la eficiencia del sistema

3.4.3. Comparación de resultados

Tabla XXI Resultados cuantitativos y cualitativos de las pruebas

Parámetro	4 psi sin mezclador	0.5 psi con mezclador (4 inyectores)	0.5 psi sin mezclador	0.5 psi con mezclador (8 inyectores)	Observación técnica
Color de la llama	Amarillento; combustión incompleta con exceso de gas	Mayormente azul; combustión completa y estable	Azul tenue; mezcla aire gas parcial	Tonos Azules intermedios, combustión más completa	El tono azul indica una mezcla estequiométrica más adecuada
Pérdidas por convección y radiación (W)	-	-	497.55	426.11	Disminuye un 14.37 %
Pérdidas por inquemados (%)	-	-	6.07	3.27	Disminuye las pérdidas por inquemados un 46.14 %
Flujo de aire caliente generado (kW)	-	-	12.66	12.87	Aumenta el flujo de aire caliente en 1.66 %
Calor que	-	-	0.96	0.85	Disminuye las

escapa por la parte trasera (kW)					pérdidas de calor en un 11.46 %
Consumo de GLP (kg/s)	-	-	0.00035	0.00033	Disminuye el consumo en 5.71 %
Rendimiento térmico directo (%)	-	-	75.43%	78.63%	Aumenta en 4.24%
Estabilidad de la llama	Turbulenta, irregular, ruidosa	Relativamente estable, uniforme y silenciosa	Medianamente estable	Estable, silenciosa y uniforme	El mezclador reduce la turbulencia y estabiliza la combustión

Validación: Los resultados confirman que el análisis y control de las variables técnicas presión del gas y flujo de aire, tienen una influencia directa en la eficiencia del quemador. La implementación del mezclador aire-gas, junto con una presión de operación reducida permitió:

- Mejorar el rendimiento energético en un 4.24 %
- Disminuir las perdidas térmicas y por inquemados
- Reducir el consumo de combustible
- Obtener una llama más estable

Se observa que al realizar cambios en la presión e incorporar la válvula mezcladora mejora las condiciones de operación del sistema, concluyendo que la optimización de las variables en el prototipo de quemador semi industrial incrementa su eficiencia.

A partir del análisis del color, estabilidad y ruido de la llama, así como de la reducción de inquemados sólidos evidenciada mediante el índice de Bacharach, se puede inferir que la configuración con mezclador opera con un coeficiente de exceso de aire más cercano a la estequiometría ideal ($\lambda \approx 1.1 - 1.2$), en comparación con el sistema sin mezclador, el cual presenta indicios de mezcla deficiente. Esta mejora en la relación aire-combustible explica el aumento de la eficiencia térmica y la disminución de

pérdidas por inquemados.

Los resultados obtenidos son válidos para quemadores a gas de tipo semi industrial y características constructivas similares al prototipo analizado. Para aplicaciones industriales de mayor potencia, se recomienda realizar estudios adicionales que consideren control automático de mezcla, análisis de gases de combustión y normativas específicas.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El análisis de la presión del gas y el flujo de aire permitió identificar la importancia de estos parámetros en la calidad de la combustión y el comportamiento de la llama. Específicamente, a presiones medias cercanas a 5 psi sin premezcla, la llama es inestable y altamente turbulenta, extendiéndose más tiempo. Esto sugiere que la combustión es incompleta. Por el contrario, cuando se reduce la presión y se premezcla con un mezclador, la llama es más estable, con una forma y distribución de longitud más adecuadas, un equilibrio entre la presión y el flujo de aire es un factor determinante para una mejor combustión.
- La evaluación de los parámetros térmicos permitió reconocer que componentes del sistema contribuían a pérdidas de energía y su influencia en el rendimiento del quemador. Se comprobó que la incorporación de un sistema de mezclado de aire-gas y ciertas modificaciones en la estructura de la línea de inyección reducen pérdidas por inquemados y mejoran la transferencia de calor hacia el medio. Además, los cambios en la línea de alimentación de GLP reducen pérdidas de presión y mejoran las condiciones de operación, lo que confirma que las variables técnicas ligadas al intercambio de calor, estabilidad de flama y consumo de combustible tienen un papel importante en el desempeño del sistema.
- Las pruebas experimentales permitieron observar de manera directa el comportamiento del quemador sometido a distintas configuraciones, mostrando oportunidades de optimización. Se identificó mejoras notorias con la adición de un mezclador y variar la configuración de los inyectores, logrando flamas más estables, compactas y uniformes. Además, las pruebas confirmaron que ajustes en la dosificación de aire-combustible y la adición de más salidas en el inyector puede aumentar la eficiencia y disminuir las pérdidas térmicas.
- La reducción de ruido generado, la disminución de oscilación de la flama y la eliminación de turbulencias excesivas muestran una mejora puntual en las

condiciones de operación del sistema. Al no tener una premezcla se presentó comportamientos propensos a retrocesos o inestabilidades, mientras que el sistema optimizado mostró un funcionamiento más seguro y predecible. Por lo tanto, el uso de un mezclador no solo ayuda a incrementar el rendimiento del quemador, sino que también ayuda a que el nivel de seguridad operativa se eleve.

- El análisis termográfico evidencia que, con el uso del mezclador, las zonas de mayor concentración térmica se distribuyen de manera más uniforme, reduciendo puntos fríos y aumentando el área de flama. Este comportamiento contribuye a mejorar el rendimiento energético del quemador y a optimizar la transferencia de calor útil.
- Las mejoras alcanzadas en estabilidad de flama, uniformidad térmica y eficiencia permiten que el quemador optimizado sea una alternativa viable para aplicaciones agroindustriales y semi industriales que requieren control térmico. El sistema presenta condiciones favorables para procesos como secado, calentamiento de aire, tratamiento térmico de materiales, entre otras aplicaciones.

4.2.Recomendaciones

- Para la toma de datos con los diferentes aparatos como la cámara termográfica, anemómetro y termocupla, es recomendable tener muy en cuenta la distancia entre el operario y el cuerpo, con la que se realizan las mediciones con el fin de tener una consistencia en los datos que se obtengan en las distintas pruebas.
- Incorporar sensores de temperatura distribuidos a lo largo del cuerpo del quemador para identificar áreas de sobrecalentamiento o pérdidas, lo que permitirá un análisis más preciso del perfil térmico del sistema.
- Completar la prueba con mediciones de emisiones de CO₂, CO y NO_x para determinar el impacto ambiental del sistema y brindar estrategias de mitigación, de manera que el prototipo esté destinado a un uso semiindustrial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. J. Rojas, F. O. Jiménez, B. G. Ramos, and R. Alván, “Análisis Experimental del Rendimiento Térmico, Potencia y Emisiones de Cocinas Anafe a Gas Licuado de Petróleo para Altitudes entre 2200 Y 4200 metros,” *Inf. Tecnológica*, vol. 28, no. 4, pp. 179–190, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000400020.
- [2] Y. Cengel, M. Boles, and M. Kanoglu, *THERMODYNAMICS AN ENGINEERING APPROACH*, 9.^a. Nueva York: McGraw-Hill Education, 2019.
- [3] M. M. Martínez, *Combustión y Quemadores*. Marcombo, 2005.
- [4] D. V. Vásconez and C. A. Sarria, “Análisis Del Almacenamiento En Sistemas De Gas Licuado De Petróleo: Tanques Estacionarios Vs. Cilindros,” *Ingenius Rev. Cienc. Tecnol.*, no. 22, 2019, doi: <https://www.redalyc.org/journal/5055/505559510015/html/>.
- [5] J. Domínguez Cerdeira, *Guía básica de Calderas*. España, 2013.
- [6] J. C. Serrano Rico and Y. A. Carranza Sánchez, “Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural,” *Sci. Tech.*, vol. 3, no. 29, pp. 139–143, 2005.
- [7] C. Theocharis, C. Drosos, M. Papoutsidakis, and G. Chamilothoris, “Safety Standards in Industrial Applications: A Requirement for Fail-Safe Systems,” vol. Volume 178 – No. 24, 2019, doi: 10.5120/ijca2019919040.
- [8] D. Green and R. Perry, *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook, Eighth Edition*, 8th ed. /. McGraw-Hill Education, 2008. Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071422949>
- [9] S. McAllister, J.-Y. Chen, and A. C. Fernandez-Pello, *Fundamentals of Combustion Processes*. in Mechanical Engineering Series. New York, NY: Springer New York, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-7943-8.
- [10] A. Santin, “Enhancing Burner Design Efficiency with CFD Software,” Quemadores Santin. Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.bruciatorisantin.com/es/2023/05/design-and-analysis/>
- [11] R. Antwi, “Combustion Engineering, Second - Kenneth W. Ragland (1) (1)”, Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/42051732/Combustion_Engineering_Second_Kenne

th_W_Ragland_1_1_

- [12] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinamica*, 8.^a edición. Mexico: McGraw-Hill Education, 2015.
- [13] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th Edition. McGraw-Hill.
- [14] F. Incropera, D. Dewitt, T. Bergman, and A. Lavine, *FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER*, Septima. New York, NY: John Wiley & Sons, 2011.
- [15] A. S. Sánchez Mendoza, “Análisis térmico para evaluar eficiencia en un calderín Pirotubular de 2 BHP del laboratorio de la Carrera de Ingeniería Mecánica,” 2019, Accessed: Feb. 25, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/29195>
- [16] J. Alfonso, “7 Eficiencia de un Proceso de Combustion - Fluidos Conocimientos ¿Es posible inferir la eficiencia,” Studocu. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-celaya/fundamentos-de-aguas-residuales/7-eficiencia-de-un-proceso-de-combustion/60332993>
- [17] J. Baukal Charles E., A. Agrawal, S. Olson, M. Gollner, and T. Jacobs, *A GALLERY OF COMBUSTION AND FIRE*. New York, NY: Cambridge University Press, 2020.
- [18] “Ingeniería Energética General.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://energianow.net/>
- [19] “Quemador de mezcla en boquilla - Todos los fabricantes industriales.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/quemador-mezcla-boquilla-88319.html>
- [20] “Boquillas de pulverización.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.danfoss.com/es-es/products/dhs/burner-components/oil-nozzles/>
- [21] J. Baukal Charles E., *Industrial Burners Handbook*. CRC Press, 2003.
- [22] admin, “Propane Air Mixers - Everything You Need to Know (And Then Some!),” Celestial Fire Glass Support. Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://support.celestialfireglass.com/faqs/propane-air-mixers-everything-you-need-to-know-and-then-some/>
- [23] “LP Propane Gas Brass Air Mixer Valve, 1/2", 90K BTU,” Celestial Fire Glass.

Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available:
<https://www.celestialfireglass.com/products/lp-propane-gas-air-mixer-valve-1-2-solid-brass-90k-btu>

[24] Apliter, “Qué es la termografía y para qué sirve | Apliter Termografía.” Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.apliter.com/blog/que-es-la-termografia-infrarroja/>

[25] Apliter, “Cámaras termográficas qué son | Todo lo que debes saber.” Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.apliter.com/camaras-termograficas-que-son/>

Anexos

Anexo A-1: Determina conductividad térmica, viscosidad cinemática y número de Prandtl

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Anexo A-2: Entalpía de deformación

Tabla A-26

Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 25 °C, 1 atm

Sustancia	Fórmula	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{g}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
Acetileno	$C_2H_2(g)$	+226,730	+209,170	200.85
Agua	$H_2O(l)$	-285,830	-237,180	69.92
Alcohol etílico	$C_2H_5OH(g)$	-235,310	-168,570	282.59
Alcohol etílico	$C_2H_5OH(l)$	-277,690	-174,890	160.70
Alcohol metílico	$CH_3OH(g)$	-200,670	-162,000	239.70
Alcohol metílico	$CH_3OH(l)$	-238,660	-166,360	126.80
Amoniaco	$NH_3(g)$	-46,190	-16,590	192.33
Benceno	$C_6H_6(g)$	+82,930	+129,660	269.20
<i>n</i> -butano	$C_4H_{10}(g)$	-126,150	-15,710	310.12
Carbón	$C(s)$	0	0	5.74
Dióxido de carbono	$CO_2(g)$	-393,520	-394,360	213.80
<i>n</i> -dodecano	$C_{12}H_{26}(g)$	-291,010	+50,150	622.83
Etano	$C_2H_6(g)$	-84,680	-32,890	229.49
Etileno	$C_2H_4(g)$	+52,280	+68,120	219.83
Hidrógeno	$H_2(g)$	0	0	130.68
Hidrógeno	$H(g)$	+218,000	+203,290	114.72
Hidroxilo	$OH(g)$	+39,460	+34,280	183.70
Metano	$CH_4(g)$	-74,850	-50,790	186.16
Monóxido de carbono	$CO(g)$	-110,530	-137,150	197.65
Nitrógeno	$N_2(g)$	0	0	191.61
Nitrógeno	$N(g)$	+472,650	+455,510	153.30
<i>n</i> -octano	$C_8H_{18}(g)$	-208,450	+16,530	466.73
<i>n</i> -octano	$C_8H_{18}(l)$	-249,950	+6,610	360.79
Oxígeno	$O_2(g)$	0	0	205.04
Oxígeno	$O(g)$	+249,190	+231,770	161.06
Peróxido de hidrógeno	$H_2O_2(g)$	-136,310	-105,600	232.63
Propano	$C_3H_8(g)$	-103,850	-23,490	269.91
Propileno	$C_3H_6(g)$	+20,410	+62,720	266.94
Vapor de agua	$H_2O(g)$	-241,820	-228,590	188.83

Anexo A-3: Propiedades del oxígeno

Tabla A-19

Propiedades de gas ideal del oxígeno, O₂

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
0	0	0	0	600	17,929	12,940	226.346
220	6,404	4,575	196.171	610	18,250	13,178	226.877
230	6,694	4,782	197.461	620	18,572	13,417	227.400
240	6,984	4,989	198.696	630	18,895	13,657	227.918
250	7,275	5,197	199.885	640	19,219	13,898	228.429
260	7,566	5,405	201.027	650	19,544	14,140	228.932
270	7,858	5,613	202.128	660	19,870	14,383	229.430
280	8,150	5,822	203.191	670	20,197	14,626	229.920
290	8,443	6,032	204.218	680	20,524	14,871	230.405
298	8,682	6,203	205.033	690	20,854	15,116	230.885
300	8,736	6,242	205.213	700	21,184	15,364	231.358
310	9,030	6,453	206.177	710	21,514	15,611	231.827
320	9,325	6,664	207.112	720	21,845	15,859	232.291
330	9,620	6,877	208.020	730	22,177	16,107	232.748
340	9,916	7,090	208.904	740	22,510	16,357	233.201
350	10,213	7,303	209.765	750	22,844	16,607	233.649
360	10,511	7,518	210.604	760	23,178	16,859	234.091
370	10,809	7,733	211.423	770	23,513	17,111	234.528
380	11,109	7,949	212.222	780	23,850	17,364	234.960
390	11,409	8,166	213.002	790	24,186	17,618	235.387
400	11,711	8,384	213.765	800	24,523	17,872	235.810
410	12,012	8,603	214.510	810	24,861	18,126	236.230
420	12,314	8,822	215.241	820	25,199	18,382	236.644
430	12,618	9,043	215.955	830	25,537	18,637	237.055
440	12,923	9,264	216.656	840	25,877	18,893	237.462
450	13,228	9,487	217.342	850	26,218	19,150	237.864
460	13,525	9,710	218.016	860	26,559	19,408	238.264
470	13,842	9,935	218.676	870	26,899	19,666	238.660
480	14,151	10,160	219.326	880	27,242	19,925	239.051
490	14,460	10,386	219.963	890	27,584	20,185	239.439
500	14,770	10,614	220.589	900	27,928	20,445	239.823
510	15,082	10,842	221.206	910	28,272	20,706	240.203
520	15,395	11,071	221.812	920	28,616	20,967	240.580
530	15,708	11,301	222.409	930	28,960	21,228	240.953
540	16,022	11,533	222.997	940	29,306	21,491	241.323
550	16,338	11,765	223.576	950	29,652	21,754	241.689
560	16,654	11,998	224.146	960	29,999	22,017	242.052
570	16,971	12,232	224.708	970	30,345	22,280	242.411
580	17,290	12,467	225.262	980	30,692	22,544	242.768
590	17,609	12,703	225.808	990	31,041	22,809	242.120

Anexo A-4: Propiedades del Nitrógeno

Tabla A-18

Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N₂

<i>T</i> K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K	<i>T</i> K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
0	0	0	0	600	17,563	12,574	212.066
220	6,391	4,562	182.639	610	17,864	12,792	212.564
230	6,683	4,770	183.938	620	18,166	13,011	213.055
240	6,975	4,979	185.180	630	18,468	13,230	213.541
250	7,266	5,188	186.370	640	18,772	13,450	214.018
260	7,558	5,396	187.514	650	19,075	13,671	214.489
270	7,849	5,604	188.614	660	19,380	13,892	214.954
280	8,141	5,813	189.673	670	19,685	14,114	215.413
290	8,432	6,021	190.695	680	19,991	14,337	215.866
298	8,669	6,190	191.502	690	20,297	14,560	216.314
300	8,723	6,229	191.682	700	20,604	14,784	216.756
310	9,014	6,437	192.638	710	20,912	15,008	217.192
320	9,306	6,645	193.562	720	21,220	15,234	217.624
330	9,597	6,853	194.459	730	21,529	15,460	218.059
340	9,888	7,061	195.328	740	21,839	15,686	218.472
350	10,180	7,270	196.173	750	22,149	15,913	218.889
360	10,471	7,478	196.995	760	22,460	16,141	219.301
370	10,763	7,687	197.794	770	22,772	16,370	219.709
380	11,055	7,895	198.572	780	23,085	16,599	220.113
390	11,347	8,104	199.331	790	23,398	16,830	220.512
400	11,640	8,314	200.071	800	23,714	17,061	220.907
410	11,932	8,523	200.794	810	24,027	17,292	221.298
420	12,225	8,733	201.499	820	24,342	17,524	221.684
430	12,518	8,943	202.189	830	24,658	17,757	222.067
440	12,811	9,153	202.863	840	24,974	17,990	222.447
450	13,105	9,363	203.523	850	25,292	18,224	222.822
460	13,399	9,574	204.170	860	25,610	18,459	223.194
470	13,693	9,786	204.803	870	25,928	18,695	223.562
480	13,988	9,997	205.424	880	26,248	18,931	223.927
490	14,285	10,210	206.033	890	26,568	19,168	224.288
500	14,581	10,423	206.630	900	26,890	19,407	224.647
510	14,876	10,635	207.216	910	27,210	19,644	225.002
520	15,172	10,848	207.792	920	27,532	19,883	225.353
530	15,469	11,062	208.358	930	27,854	20,122	225.701
540	15,766	11,277	208.914	940	28,178	20,362	226.047
550	16,064	11,492	209.461	950	28,501	20,603	226.389
560	16,363	11,707	209.999	960	28,826	20,844	226.728
570	16,662	11,923	210.528	970	29,151	21,086	227.064
580	16,962	12,139	211.049	980	29,476	21,328	227.398
590	17,262	12,356	211.562	990	29,803	21,571	227.728

Anexo A-5: Propiedades del dióxido de carbono

Tabla A-20

Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO₂

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
0	0	0	0	600	22,280	17,291	243.199
220	6,601	4,772	202.966	610	22,754	17,683	243.983
230	6,938	5,026	204.464	620	23,231	18,076	244.758
240	7,280	5,285	205.920	630	23,709	18,471	245.524
250	7,627	5,548	207.337	640	24,190	18,869	246.282
260	7,979	5,817	208.717	650	24,674	19,270	247.032
270	8,335	6,091	210.062	660	25,160	19,672	247.773
280	8,697	6,369	211.376	670	25,648	20,078	248.507
290	9,063	6,651	212.660	680	26,138	20,484	249.233
298	9,364	6,885	213.685	690	26,631	20,894	249.952
300	9,431	6,939	213.915	700	27,125	21,305	250.663
310	9,807	7,230	215.146	710	27,622	21,719	251.368
320	10,186	7,526	216.351	720	28,121	22,134	252.065
330	10,570	7,826	217.534	730	28,622	22,522	252.755
340	10,959	8,131	218.694	740	29,124	22,972	253.439
350	11,351	8,439	219.831	750	29,629	23,393	254.117
360	11,748	8,752	220.948	760	20,135	23,817	254.787
370	12,148	9,068	222.044	770	30,644	24,242	255.452
380	12,552	9,392	223.122	780	31,154	24,669	256.110
390	12,960	9,718	224.182	790	31,665	25,097	256.762
400	13,372	10,046	225.225	800	32,179	25,527	257.408
410	13,787	10,378	226.250	810	32,694	25,959	258.048
420	14,206	10,714	227.258	820	33,212	26,394	258.682
430	14,628	11,053	228.252	830	33,730	26,829	259.311
440	15,054	11,393	229.230	840	34,251	27,267	259.934
450	15,483	11,742	230.194	850	34,773	27,706	260.551
460	15,916	12,091	231.144	860	35,296	28,125	261.164
470	16,351	12,444	232.080	870	35,821	28,588	261.770
480	16,791	12,800	233.004	880	36,347	29,031	262.371
490	17,232	13,158	233.916	890	36,876	29,476	262.968
500	17,678	13,521	234.814	900	37,405	29,922	263.559
510	18,126	13,885	235.700	910	37,935	30,369	264.146
520	18,576	14,253	236.575	920	38,467	30,818	264.728
530	19,029	14,622	237.439	930	39,000	31,268	265.304
540	19,485	14,996	238.292	940	39,535	31,719	265.877
550	19,945	15,372	239.135	950	40,070	32,171	266.444
560	20,407	15,751	239.962	960	40,607	32,625	267.007
570	20,870	16,131	240.789	970	41,145	33,081	267.566
580	21,337	16,515	241.602	980	41,685	33,537	268.119
590	21,807	16,902	242.405	990	42,226	33,995	268.670

Anexo A-6: Propiedades del vapor de agua

Tabla A-23

Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H₂O

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
0	0	0	0	600	20,402	15,413	212.920
220	7,295	5,466	178.576	610	20,765	15,693	213.529
230	7,628	5,715	180.054	620	21,130	15,975	214.122
240	7,961	5,965	181.471	630	21,495	16,257	214.707
250	8,294	6,215	182.831	640	21,862	16,541	215.285
260	8,627	6,466	184.139	650	22,230	16,826	215.856
270	8,961	6,716	185.399	660	22,600	17,112	216.419
280	9,296	6,968	186.616	670	22,970	17,399	216.976
290	9,631	7,219	187.791	680	23,342	17,688	217.527
298	9,904	7,425	188.720	690	23,714	17,978	218.071
300	9,966	7,472	188.928	700	24,088	18,268	218.610
310	10,302	7,725	190.030	710	24,464	18,561	219.142
320	10,639	7,978	191.098	720	24,840	18,854	219.668
330	10,976	8,232	192.136	730	25,218	19,148	220.189
340	11,314	8,487	193.144	740	25,597	19,444	220.707
350	11,652	8,742	194.125	750	25,977	19,741	221.215
360	11,992	8,998	195.081	760	26,358	20,039	221.720
370	12,331	9,255	196.012	770	26,741	20,339	222.221
380	12,672	9,513	196.920	780	27,125	20,639	222.717
390	13,014	9,771	197.807	790	27,510	20,941	223.207
400	13,356	10,030	198.673	800	27,896	21,245	223.693
410	13,699	10,290	199.521	810	28,284	21,549	224.174
420	14,043	10,551	200.350	820	28,672	21,855	224.651
430	14,388	10,813	201.160	830	29,062	22,162	225.123
440	14,734	11,075	201.955	840	29,454	22,470	225.592
450	15,080	11,339	202.734	850	29,846	22,779	226.057
460	15,428	11,603	203.497	860	30,240	23,090	226.517
470	15,777	11,869	204.247	870	30,635	23,402	226.973
480	16,126	12,135	204.982	880	31,032	23,715	227.426
490	16,477	12,403	205.705	890	31,429	24,029	227.875
500	16,828	12,671	206.413	900	31,828	24,345	228.321
510	17,181	12,940	207.112	910	32,228	24,662	228.763
520	17,534	13,211	207.799	920	32,629	24,980	229.202
530	17,889	13,482	208.475	930	33,032	25,300	229.637
540	18,245	13,755	209.139	940	33,436	25,621	230.070
550	18,601	14,028	209.795	950	33,841	25,943	230.499
560	18,959	14,303	210.440	960	34,247	26,265	230.924
570	19,318	14,579	211.075	970	34,653	26,588	231.347
580	19,678	14,856	211.702	980	35,061	26,913	231.767
590	20,039	15,134	212.320	990	35,472	27,240	232.184

Anexo A-7: Propiedades atmosféricas a gran altitud

Tabla A-16

Propiedades de la atmósfera a gran altitud

Altitud, m	Temperatura, °C	Presión, kPa	Gravedad g, m/s ²	Velocidad del sonido, m/s	Densidad, kg/m ³	Viscosidad μ , kg/m · s	Conductivi- dad térmica, W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789×10^{-5}	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783×10^{-5}	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777×10^{-5}	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771×10^{-5}	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764×10^{-5}	0.0250
1000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758×10^{-5}	0.0249
1200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752×10^{-5}	0.0248
1400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745×10^{-5}	0.0247
1600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739×10^{-5}	0.0245
1800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732×10^{-5}	0.0244
2000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	1.726×10^{-5}	0.0243
2200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	1.720×10^{-5}	0.0242
2400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	1.713×10^{-5}	0.0241
2600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	1.707×10^{-5}	0.0240
2800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	1.700×10^{-5}	0.0239
3000	-4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	1.694×10^{-5}	0.0238
3200	-5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	1.687×10^{-5}	0.0237
3400	-7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	1.681×10^{-5}	0.0236
3600	-8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	1.674×10^{-5}	0.0235
3800	-9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	1.668×10^{-5}	0.0234
4000	-10.98	61.66	9.794	324.6	0.819	1.661×10^{-5}	0.0233
4200	-12.3	60.07	9.794	323.8	0.802	1.655×10^{-5}	0.0232
4400	-13.6	58.52	9.793	323.0	0.785	1.648×10^{-5}	0.0231
4600	-14.9	57.00	9.793	322.2	0.769	1.642×10^{-5}	0.0230
4800	-16.2	55.51	9.792	321.4	0.752	1.635×10^{-5}	0.0229
5000	-17.5	54.05	9.791	320.5	0.736	1.628×10^{-5}	0.0228
5200	-18.8	52.62	9.791	319.7	0.721	1.622×10^{-5}	0.0227
5400	-20.1	51.23	9.790	318.9	0.705	1.615×10^{-5}	0.0226
5600	-21.4	49.86	9.789	318.1	0.690	1.608×10^{-5}	0.0224
5800	-22.7	48.52	9.785	317.3	0.675	1.602×10^{-5}	0.0223
6000	-24.0	47.22	9.788	316.5	0.660	1.595×10^{-5}	0.0222
6200	-25.3	45.94	9.788	315.6	0.646	1.588×10^{-5}	0.0221
6400	-26.6	44.69	9.787	314.8	0.631	1.582×10^{-5}	0.0220
6600	-27.9	43.47	9.786	314.0	0.617	1.575×10^{-5}	0.0219
6800	-29.2	42.27	9.785	313.1	0.604	1.568×10^{-5}	0.0218
7000	-30.5	41.11	9.785	312.3	0.590	1.561×10^{-5}	0.0217
8000	-36.9	35.65	9.782	308.1	0.526	1.527×10^{-5}	0.0212
9000	-43.4	30.80	9.779	303.8	0.467	1.493×10^{-5}	0.0206
10,000	-49.9	26.50	9.776	299.5	0.414	1.458×10^{-5}	0.0201
12,000	-56.5	19.40	9.770	295.1	0.312	1.422×10^{-5}	0.0195
14,000	-56.5	14.17	9.764	295.1	0.228	1.422×10^{-5}	0.0195
16,000	-56.5	10.53	9.758	295.1	0.166	1.422×10^{-5}	0.0195
18,000	-56.5	7.57	9.751	295.1	0.122	1.422×10^{-5}	0.0195

Anexo A-8: Propiedades del aire

Tabla A-17

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

Anexo B-1: Ficha de medición de temperatura del flujo caliente que escapa por enfrente y por la parte de atrás

- Sistema sin mezclador a 3447.38 Pa (0.5 psi). 4 inyectores en configuración +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE TEMPERATURA			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de entrada:	12/06/2025	Fecha de salida	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
FLUJO DEL AIRE QUE GENERA EL QUEMADOR			
Foto			
			
RESULTADO			
	°C	°K	
Temperatura	108.1	381.25	

FLUJO QUE ESCAPA POR LA PARTE DE ATRÁS



	°C	°K
Temperatura	28.6	301.75

- Sistema modificado con mezclador y 8 inyectores a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO TOMA DE TEMPERATURA



Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
FLUJO DEL AIRE QUE GENERA EL QUEMADOR			
Foto			



RESULTADO

	°C	°K
Temperatura	103.9	377.06

FLUJO QUE ESCAPA POR LA PARTE DE ATRÁS



	°C	°K
TEMPERATURA	21.4	294.55

Anexo B-2: Análisis de la flama

- Análisis de la flama del sistema a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi) sin mezclador 4 inyectores, configuración +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ANÁLISIS DE FLAMA			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
Característica	Flama		
Visualización real de la flama			
Forma	Irregular		
Color visual	Azul con tonalidades naranja		
Estabilidad	Media/osilaciones constantes		
Ruido	Medio		
Longitud de flama	450 mm		
Distancia entre la flama y los inyectores	La flama se despega cerca a los 100 mm de los inyectores		

- **Análisis de la flama del sistema a una presión de 27579.04 Pa (4 psi) sin mezclador, 4 inyector, configuración +**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE ANÁLISIS DE FLAMA			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
Característica		Flama	
Visualización real de la flama			
Forma	Irregular alargada		
Color visual	Amarillo		
Estabilidad	Baja/osilaciones bruscas		
Longitud de flama	600 mm		
Distancia entre la flama y los inyector:	La flama se despega mucho de los inyector cerca de los 120 mm		

- Análisis de la flama del sistema a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi) con mezclador, 4 inyectores, configuración x

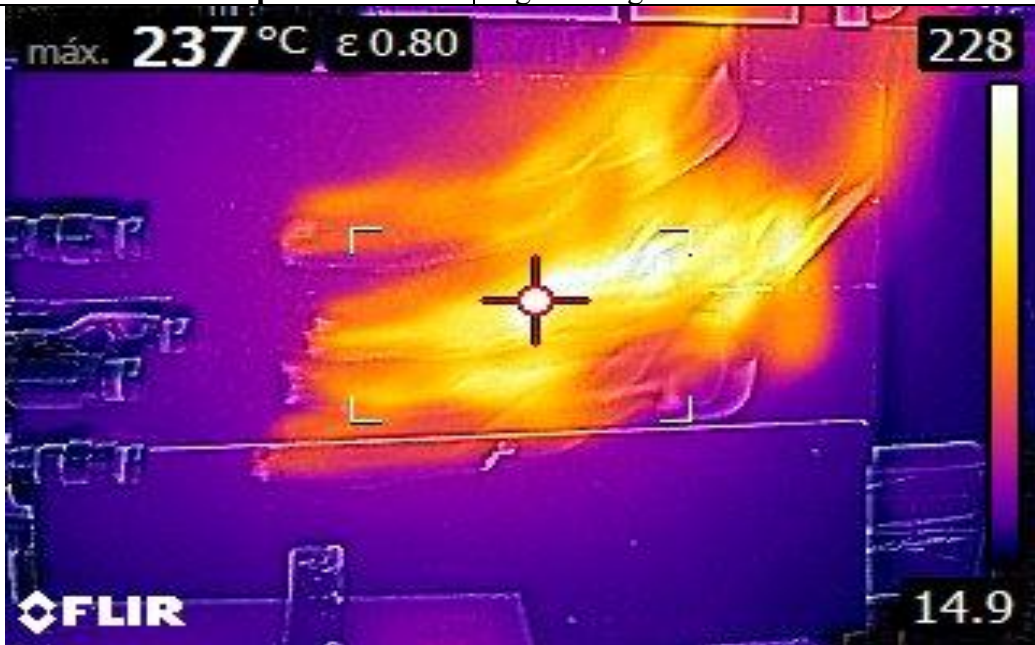
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE TOMA DE TEMPERATURA			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	15/09/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
Característica		Flama	
Visualización real de la flama			
Forma		Uniforme	
Color visual		Anaranjado con tonalidades azul	
Estabilidad		Uniforme	
Longitud de flama		400 mm	
Distancia entre la flama y los inyectores		La flama no se despega demaciado del inyector con una distancia cerca de los 20 mm	

- **Análisis de la flama del sistema a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi) con mezclador y 8 inyectores, configuración x**

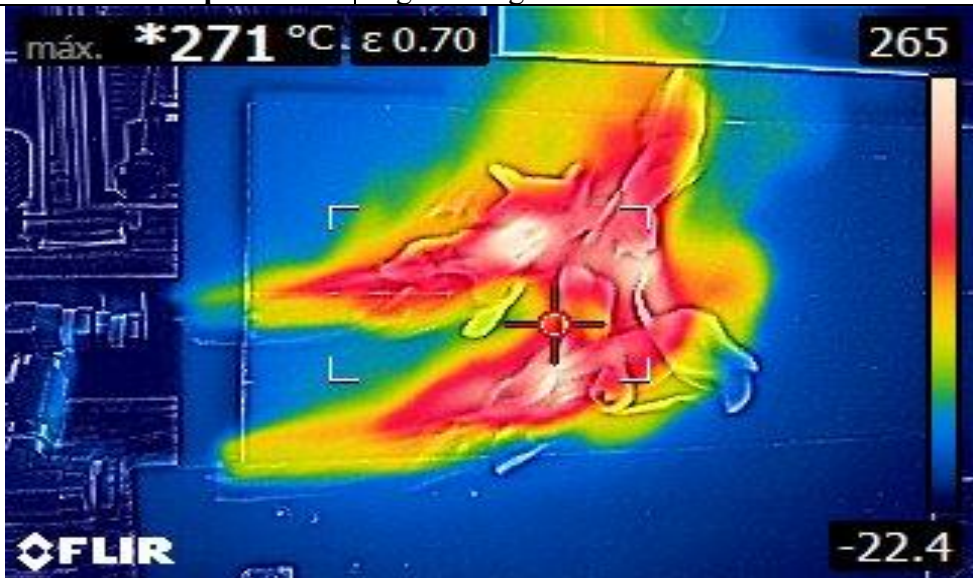
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE TOMA DE TEMPERATURA			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	27/10/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
Característica		Flama	
Visualización real de la flama			
Forma		Uniforme	
Color visual		Anaranjado con tonalidades azul	
Estabilidad		Medio, oscilaciones leves	
Longitud de flama		400 mm	
Distancia entre la flama y los inyectores		La flama no se despega del inyector	

Anexo B-3: Termografía

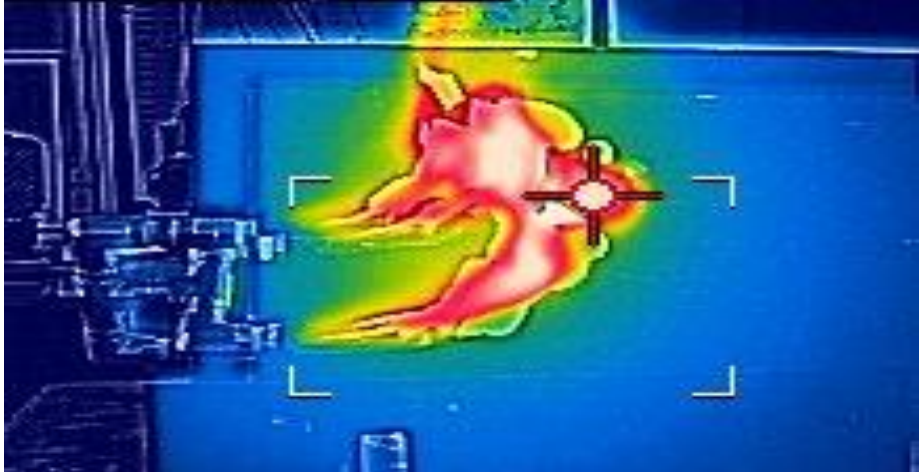
- Sistema sin mezclador a 3447.38 Pa (0.5 psi), 4 inyectores, configuración en +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO TERMOGRÁFICO			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
			
RESULTADO			
Distribución:	Irregular		
Simetría:	Medianamente simétrico		
Puntos calientes:	Dispersos		
	Uniformidad térmica media		

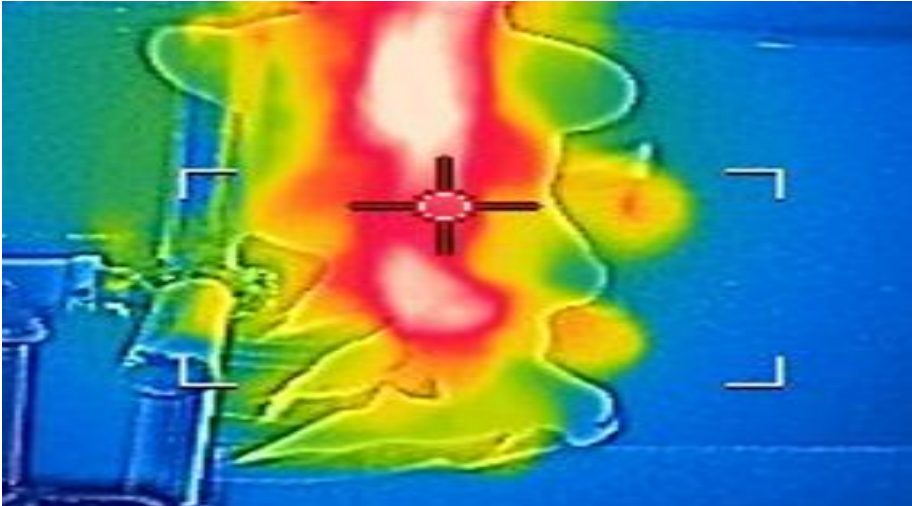
- Sistema sin mezclador a alta presión 27579.04 (4psi), 4 inyectores, configuración +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO TERMOGRÁFICO			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
			
RESULTADO			
Distribución:	Irregular		
Simetría:	Asimétrico		
Puntos calientes:	Dispersos		
Comportamiento visual:	Uniformidad térmica baja		

- Sistema modificado con mezclador a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi), 4 inyectores, configuración en x

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO TERMOGRÁFICO  			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
			
RESULTADO			
Distribución:	Homogénea		
Simetría:	Patrón simétrico		
Puntos calientes:	Mayormente centrado		
Comportamiento visual:	Uniformidad térmica media		

- Sistema modificado con mezclador y 8 inyectores a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi), configuración en x

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO TERMOGRÁFICO			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	27/10/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
			
RESULTADO			
Distribución:	Homogénea		
Simetría:	Patrón simétrico		
Puntos calientes:	Centrados		
Comportamiento visual:	Uniformidad térmica alta		

ANEXO B-4: Ficha de consumo de GLP

- Sistema sin mezclador a 3447.38 Pa (0.5 psi), 4 inyectores, configuración en +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO TOMA DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE				
 				
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López	
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025	
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm	
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera		
				
RESULTADO				
	Al inicio	Al final	Tiempo	Total
Consumo	456 lt	477 lt	2 min	21 lt

- Sistema con mezclador y 4 inyectores a 3447.38 Pa (0.5 psi), configuración en x

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
FICHA DE REPORTE DE ENSAYO TOMA DE CONSUMO DE
COMBUSTIBLE



Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	15/09/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	



RESULTADO

	Al inicio	Al final	Tiempo	Total
Consumo	492 lt	522 lt	2 min	30 lt

- Sistema modificado con mezclador y 8 inyectores a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi), configuración +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE				
 				
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López	
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	27/10/2025	
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm	
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera		
				
RESULTADO				
	Al inicio	Al final	tiempo	Total
Consumo	534 lt	514 lt	2 min	20 lt

ANEXO B-5: Flujo de aire

- Sistema sin mezclador a 3447.38 Pa (0.5 Psi), 4 inyectores, configuración en +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE FLUJO DE AIRE			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
			
RESULTADO			
Dirección de flujo:	El flujo se dispersa medianamente		
Uniformidad:	Medianamente uniforme		
Estabilidad:	Turbulencias visibles		
Interacción con el ducto:	Media		

- Sistema sin mezclador a alta presión 27579.04 (4psi), 4 inyectores,

configuración en +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE FLUJO DE AIRE



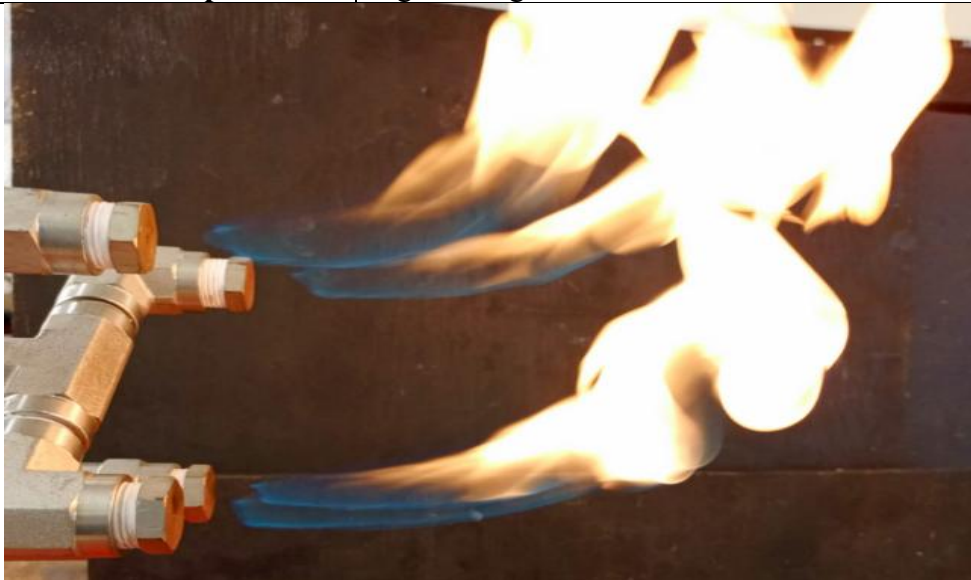
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
			
RESULTADO			
Dirección de flujo:		Se dispersa en múltiples direcciones	
Uniformidad:		caótica	
Estabilidad:		Fluctuaciones bruscas	
Interacción con el ducto:		Alta	

- Sistema modificado con mezclador y 4 inyectores a una presión de 3447.38 Pa (0.5 Psi), configuración en x

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE FLUJO DE AIRE



Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	15/09/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	



RESULTADO

Dirección de flujo:	La trayectoria es estable
Uniformidad:	Distribución uniforme del flujo
Estabilidad:	Constante
Interacción con el ducto:	Baja

- Sistema modificado con ventilador a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi)
4 inyectores, configuración en +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE FLUJO DE AIRE			
 			
Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	12/06/2025	Fecha de finalización:	12/06/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	
			
RESULTADO			
Dirección de flujo:	La trayectoria es un patrón recto		
Uniformidad:	Mala distribución		
Estabilidad:	Inestable		
Interacción con el ducto:	Baja		

- Sistema modificado con mezclador y 8 inyectores a una presión de 3447.38 Pa (0.5 psi), configuración en +

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
FICHA DE REPORTE DE ENSAYO DE FLUJO DE AIRE



Lugar:	Laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica	Realizado por:	Kevin López
Fecha de inicio:	09/10/2025	Fecha de finalización:	09/10/2025
Hora de inicio:	9:30 am	Hora de finalización:	12:30 pm
Revisado por:		Ing. Santiago Cabrera	



RESULTADO

Dirección de flujo:	La trayectoria es un patrón ascendente
Uniformidad:	Mayormente uniforme
Estabilidad:	Flujo constante y suave
Interacción con el ducto:	Media

Anexo C1: Ficha técnica

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	Facultad de ingeniería civil y mecánica		
	Carrera de mecánica		
Máquina	Equipo	x	Sistema
Laboratorio de energías			
PROTOTIPO DE QUEMADOR DE GLP DE BAJA POTENCIA PARA SECADO AGROINDUSTRIAL			
CARACTERÍSTICAS GENERALES			
Largo	972 mm	Presión GLP	0.5 psi
Alto	548	Temperatura máxima	490.2 °C
Ancho	432	Peso	7 kg
Componentes			
Codo acople para aire		Varilla de soporte	
Válvula para aire		Válvula para gas	
Rueda		Soporte	
Base		Anillo de refuerzo	
Cilindro exterior 2		Cilindro interior 2	
Acople hembra tubular		Anillo refractario	
Función principal			
El prototipo de quemador de GLP de baja potencia genera una fuente de calor controlada mediante la combustión eficiente de gas licuado de petróleo (GLP), destinado a procesos de productos agroindustriales. Su diseño optimiza el consumo energético y mejora la uniformidad del proceso de secado.			
Elaborad por	Kevin López	Revisado por:	Ing. Santiago Cabrera