



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
COLEGIO DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**MONITOREO Y ANÁLISIS TÉRMICO DEL QUEMADOR
PROTOTIPO FP-1**

PRESENTA:

DANIEL ACA RAMÍREZ

**TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIATURA EN INGENIERIA QUÍMICA**

ASESOR

DRA. MAYRA RUIZ REYES

COASESOR

DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

H. Puebla de Zaragoza Junio de 2024



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/097/2024
Asunto: Registro de Tema de Tesis.

C. DANIEL ACA RAMÍREZ
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Química cuyo título es el siguiente:

"MONITOREO Y ANÁLISIS TÉRMICO DEL QUEMADOR PROTOTIPO FP- I"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Directora de Tesis: Dra. Mayra Ruiz Reyes.
Co-Director: Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., 5 de Mayo de 2024

Dra. Valeria Jordana González Coronel
Secretaría Académica

C.c.p. Directora de Tesis: Dra. Mayra Ruiz Reyes.
C.c.p. Co-Director: Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre.
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.R. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251



Autorización de Impresión de Tesis

Ingeniería Química (X)
Ingeniería Ambiental () Matrícula: 201904023
Ingeniería en Alimentos ()
Ingeniería en Materiales ()

Al C. Sustentante Daniel Aca Ramírez

De acuerdo a la presentación y revisión de la tesis:

MONITOREO Y ANÁLISIS TÉRMICO DEL QUEMADOR PROTOTIPO FP 1

se aprueba la impresión y empastado de la misma.

Jurado de examen profesional:

Presidente: Georgette Rebollos Pérez Firma: [Signature]
Secretario: Fernanda Humberto Del Valle Salas [Signature]
Vocal: Mayra Ruiz Reyes [Signature]
Francisco Manuel Nolasco Aguirre [Signature]

Fecha de examen: _____

H. Puebla de Zaragoza a 30 de Mayo de 2024.

1. AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios pues él es quien me ha dado todo para poder lograr cumplir esta meta y recordando en todo momento que “Todo lo puedo en Cristo en que me Fortalece” Filipenses 4:13.

De igual forma quiero agradecer a mi Padre, Omar Aca, pues es el quien me ha apoyado en todo momento mostrando su comprensión, cariño, amor y sabiduría a lo largo de mi vida, así como a mi madre Mónica Ramírez pues ella ha estado guiándome y enseñándome todo lo que se hasta este momento siendo una madre excelente pues ella siempre desde muy pequeño me mostro este amor que tengo a lo que hago, también quiero agradecer a mi hermana Dafne pues desde que llego a mi vida ella siempre ha sido un pilar fundamental de esta pues ella siempre está ahí para poder escucharme y entenderme.

Agradezco a todos los amigos que he encontrado dentro de esta instancia de la universidad pues ellos me han ayudado en todo momento a poder seguir adelante y que también estuvieron en momentos donde de verdad los necesitaba y me mostraron el valor de una verdadera amistad. Así como a todas las personas que he podido conocer a través de estos años de formación

Agradezco a cada uno de los docentes que han sido muy buenos conmigo y muestran en cada momento esa amabilidad y humildad que los hace tan especiales pues ellos también me han dejado llegar hasta este punto con el conocimiento que me han transmitido.

Finalmente quiero agradecer en especial a la Doctora Mayra pues ella me ha apoyado a pesar de todos los errores y fallas que pude y podré tener pues en cada uno de estos errores ella siempre mostro su amabilidad y comprensión dándome esta oportunidad de poder trabajar y aprender de ella, sinceramente para mi siendo la mejor docente que hay dentro de nuestra facultad pues no hay nadie con su inteligencia, comprensión y humildad por lo que siempre estaré agradecido de la oportunidad que me da haber trabajado bajo su guía.

Quiero recalcar que sin cada uno de los mencionados aquí mismo no sería la persona que soy hoy mismo por eso gracias nuevamente a cada uno de ustedes.

2. INDICE

1. AGRADECIMIENTOS.....	I
2. INDICE.....	II
4. INDICE DE TABLAS.....	V
5. INDICE DE ECUACIONES.....	VI
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.5 OBJETIVOS.....	5
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
Capítulo 2 ANTECEDENTES.....	6
2 Generalidades.....	7
2.1 Combustión.....	9
2.2 Quemadores.....	12
2.2.1 Tipos de quemadores.....	13
2.2.2 Quemador utilizado en el proyecto.....	13
2.2.3 Desempeño de un quemador.....	17
2.2.4 Algunas disposiciones para la aprobación de quemadores atmosféricos.....	19
2.3 Monitoreo de un quemador.....	23
2.3.1 Termopares.....	26
2.3.2 ARDUINO.....	28
2.4 Análisis Térmico de quemadores.....	29
Capítulo 3 METODOLOGÍA.....	33

3	Metodología.....	34
3.1	Metodología objetivo 1 Instrumentación	35
3.2	Metodología objetivo 2 Programación	36
3.2.1	Metodología objetivo 3 Interfaz	37
Capítulo 4 RESULTADOS		48
4	Resultados.....	49
4.1	Instrumentación.....	49
4.2	Programación en Arduino	51
4.3	Validación de la programación	51
4.4	Lecturas del quemador de Hidrógeno	57
4.5	Estimación de la eficiencia de un quemador de hidrógeno a partir de las temperaturas	65
4.6	Eficiencia del quemador dentro de la interfaz.....	66
4.7	Sostenimiento de la Temperatura	67
4.8	Interfaz para la visualización de datos	68
5	CONCLUSIONES.....	73
6	REFERENCIAS	74

3. INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Electrolizador alcalino monopolar (García J. C., 2012).....	8
Figura 2. Diagrama de diseño de un Horno típico (YOKOGAMA, 2017)	12
Figura 3. Diagrama de un quemador atmosférico	14
Figura 4. Diagrama de Electrolizador y Quemador.....	35
Figura 5. Diagrama de conexión de termopares y placa Arduino	37
Figura 6. Secuencia de cálculo Eficiencia Quemador	40
Figura 7. Grafica de la Densidad del aire ASPEN PLUS V.8.8.....	42
Figura 8. Correlación densidad del aire.....	43
Figura 9. Grafica del Cp del aire ASPEN PLUS V.8.8	44
Figura 10. Correlación del Cp del aire	44
Figura 11. Secuencia de cálculo Sostenimiento de Temperatura.	46
Figura 12. Foto de la prueba de termómetro mercurio vs termopar	52
Figura 13. Comparación Termopar vs Termómetro.....	52
Figura 14. Diagrama de mechero de etanol.....	53
Figura 15. Lecturas de temperaturas en mechero de alcohol	54
Figura 16. Diagrama de disposición de termopares en el quemador.....	55
Figura 17. Temperaturas del quemador preliminares	56
Figura 18. Diagrama final de posición de Termopares	57
Figura 19. Lecturas de Temperatura en el Quemador de Hidrógeno	58
Figura 20. Lecturas de Temperatura del Termopar 1 en el Quemador de Hidrógeno.....	59
Figura 21. Análisis estadístico del Termopar 1	59
Figura 22. Lecturas de Temperatura del Termopar 2 en el Quemador de Hidrógeno.....	60
Figura 23. Análisis estadístico del Termopar 2	60

Figura 24. Lecturas de Temperatura del Termopar 3 en el Quemador de Hidrógeno.....	61
Figura 25. Análisis estadístico del Termopar 3	61
Figura 26. Lecturas de Temperatura del Termopar 4 en el Quemador de Hidrógeno.....	62
Figura 27. Análisis estadístico del Termopar 4	62
Figura 28. Lecturas de Temperatura del Termopar 5 en el Quemador de Hidrógeno.....	63
Figura 29. Análisis estadístico del Termopar 5	63
Figura 30. Lecturas de Temperatura del Termopar 6 en el Quemador de Hidrógeno.....	64
Figura 31. Análisis estadístico del Termopar 6	64
Figura 32. Grafica de la Eficiencia Térmica.....	67
Figura 33. Porcentaje de Error de cada termopar con respecto a la temperatura en estado estacionario	68
Figura 34. Interfaz en Simulink.....	69

4. INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes recomendados para la reacción H_2-O_2 (J, 1984).....	10
Tabla 2. Propiedades de combustión del metano e hidrógeno (García & Amell, 2006)	11
Tabla 3. Parámetros e indicadores de desempeño del quemador (Varón, 2005).....	18
Tabla 4. Velocidades máximas de combustión en aire (Meyer & Caneiro, 2004).....	20
Tabla 5. Resumen de estudios de quemadores en mezcla de H_2 (Restrepo, 2023).....	22
Tabla 6. Clasificación de termopares más comunes (OMEGA TM, 2013).....	28
Tabla 7. Requisitos de medición.	35
Tabla 8. Calculo del Volúmen.....	41
Tabla 9. Colores y Rango de Led	47
Tabla 10. Comparación de tecnologías.....	49
Tabla 11. Comparación de precios en diferentes tecnologías.....	50

Tabla 12. Termopares más comunes	50
--	----

5. INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Reacción de combustión de Hidrógeno	9
Ecuación 2. Reacción de producción de Hidrógeno	9
Ecuación 3. Ecuación de Arrhenius	10
Ecuación 4. Eficiencia Térmica	40
Ecuación 5. Balance de Energía Flux de Calor	40
Ecuación 6. Flujo Molar	41
Ecuación 7. Flujo Volumétrico	41
Ecuación 8. Correlación Densidad del Aire	43
Ecuación 9. Correlación Cp del Aire	45
Ecuación 10. Correlación del ΔH_0	45
Ecuación 11. Sostenimiento de la Temperatura	45
Ecuación 12. Porcentaje de Error en el Sostenimiento de la Temperatura	45
Ecuación 13. Calculo de Temperatura Teórica	65
Ecuación 14. Eficiencia del quemador	66

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El uso del hidrógeno como fuente de energía en los procesos de combustión ha aumentado debido a la necesidad de fuentes de energía alternativas y renovables. El uso de hidrógeno para aumentar el poder calorífico del combustible o para mejorar la estabilidad de la llama ha sido de gran interés (Nam, Lee, & Jung, 2023). El hidrógeno es un energético secundario y se puede producir de varias maneras. La electrólisis alcalina es la tecnología de electrólisis más avanzada para aplicaciones a gran y pequeña escala. Esta se basa en el uso de un electrolito: una disolución acuosa de una base fuerte, generalmente NaOH o KOH. Debido a que tiene una alta conductividad iónica, este tipo de electrolito es adecuado (Fabrega & Rendé, 2020). Para el suministro de energía térmica en los procesos productivos se utilizan equipos de calentamiento directo o fuego indirecto, cuya energía térmica se obtiene a través de la quema de combustibles en hornos. Uno de los componentes más relevantes en los hornos son los quemadores; los quemadores son los componentes de alta complejidad diseñados para mejorar la eficiencia de combustión mediante sistemas de control automático para el encendido y control de la operación (Abbasi, L, Wanke, SE, & Hayes, 2022). En nuestro caso de estudio se utilizó un quemador del tipo atmosférico o premezclado parcial en este tipo de quemadores se produce una primera entrada de aire al quemador inducido por el gas que está saliendo de un inyector. Esto genera una premezcla de aire combustible en la tobera del quemador. La mezcla puede variar según la entrada de aire deseada, y la velocidad de esta es directamente proporcional a la velocidad de salida del gas (Gómez & Llanos, 2013). En el diseño de quemadores, el estudio de las variaciones locales o efectos de parámetros de entrada como la relación aire-combustible, presión y temperatura de entrada, flujo, etc., en las oscilaciones en la liberación de calor e inestabilidad del proceso de combustión. Si bien el aprovechamiento de la energía obtenida en el proceso de combustión del hidrógeno es hoy en día de gran importancia, el desarrollo de metodologías y sistemas que permitan la caracterización del proceso de combustión a través de la morfología, estabilidad y determinación de variables de desempeño térmico es relevante en el diseño de quemadores y caracterización del proceso de combustión (M. Reyes, 2021). Una forma muy eficiente para medir la temperatura son los termopares los cuales son sensores de temperatura elaborados con materiales dieléctricos o mecánicos. Se forman uniendo dos materiales de naturaleza distinta mediante una soldadura o fusión (Evaristo, 1979), el termopar es por mucho el sensor de temperatura más usado en la industria por diferentes razones, como el amplio intervalo de temperatura de uso, su robustez, la buena exactitud, rápida respuesta a cambios de temperatura, versatilidad de uso y bajo costo (Evaristo, 1979), en este trabajo se ocuparon los termopares tipo K pues estos cuentan con una combinación de Chromega (aleación de níquel y cromo) – Alomega (aleación de níquel y aluminio). Con un rango de medición de -200°C a $1\ 250^{\circ}\text{C}$. Tiene un uso limitado en vacío o atmósferas

reductoras. Dispone de un amplio rango de temperatura, la cual es la calibración más popular (JM Industrial Technology , 2024).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La necesidad de fuentes de energía alternativas y renovables ha impulsado el uso de hidrógeno como fuente de energía en los procesos de combustión, el uso de hidrógeno ya sea para incrementar el poder calorífico del combustible o para mejorar la estabilidad de la flama ha sido de gran interés (Logan, 2004). Así mismo, en el diseño de quemadores, el estudio de las variaciones locales o efectos de parámetros de entrada como la relación aire-combustible, presión, temperatura de entrada, flujo, etc., son de gran importancia para el diseño de estos (Roldán, 2023). Si bien el aprovechamiento de la energía obtenida en el proceso de combustión del hidrógeno es hoy en día de gran importancia, el desarrollo de metodologías y sistemas que permitan la caracterización del proceso de combustión a través de la morfología, estabilidad y determinación de variables de desempeño térmico es relevante en el diseño de quemadores y caracterización del proceso de combustión.

La falta de caracterización, monitoreo y análisis térmico en los quemadores de hidrógeno representa un problema grande pues la caracterización es la base principal para el mejoramiento del diseño de quemadores de este tipo pues sin un análisis térmico correcto y preciso es difícil seguir con el desarrollo de mejores quemadores para así tener una mayor eficiencia en la combustión y minimizando las emisiones que este pueda llegar a tener, por lo que el monitoreo y análisis térmico representa un avance claro en los fundamentos en la mejora de quemadores de hidrógeno.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La investigación y desarrollo de estrategias avanzadas de monitoreo y análisis térmico en quemadores atmosféricos de hidrógeno se posiciona como una necesidad crítica en el contexto de la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. La elección de este tema responde a una serie de desafíos y oportunidades en el campo de la energía, marcados por la urgencia de mitigar el cambio climático y mejorar la eficiencia energética en diversas aplicaciones industriales. Se centra principalmente en el desarrollo de herramientas que permitan la caracterización de procesos o fenómenos para la generación de información dirigida al diseño de equipos específicamente quemadores.

1.4 HIPÓTESIS

Mediante la implementación de sistemas avanzados de monitoreo y análisis térmico en quemadores atmosféricos de hidrógeno, es posible mejorar significativamente la eficiencia operativa para el control preciso de la temperatura, la optimización del flujo energético de trabajo del quemador y la mejora del diseño.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

- Investigar y desarrollar estrategias innovadoras de monitoreo y análisis térmico en quemadores atmosféricos de hidrógeno, con el propósito de mejorar la eficiencia operativa y reducir las emisiones de contaminantes.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar la instrumentación del sistema de monitoreo.
2. Desarrollar y programar el sistema de monitoreo térmico de un quemador prototipo de hidrógeno.
3. Desarrollar una interfaz para procesamiento y visualización de datos.

Capítulo 2 ANTECEDENTES

2 Generalidades

El desabasto de energía en el mundo lleva a la búsqueda de fuentes alternas de energía que cubran las necesidades energéticas bajo principios de sustentabilidad y sostenibilidad; la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en su reforma del 9 de enero de 2015, menciona que: “El Desarrollo Sustentable es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.” El desarrollo sostenible está definido como desarrollo que cubre las necesidades presentes sin comprometer la necesidad de cubrir las necesidades de las futuras generaciones; en el marco de esta definición fueron evaluados cuatro indicadores del desarrollo sustentable de los diferentes ciclos de combustible en la producción de hidrógeno en México (Logan, 2004). Henry Cavendish, un científico británico, descubrió el hidrógeno en 1776. Realizó un experimento para obtener agua combinando oxígeno e hidrógeno con una chispa eléctrica. Como estos elementos, los términos "aire sustentador de la vida" y "aire inflamable" no eran conocidos. En 1785, el químico francés Antoine Lauren Lavoisier repitió el experimento y nombró al “aire sustentador de la vida” oxígeno y al “aire inflamable” hidrógeno. El hidrógeno es un energético secundario y se puede producir de varias maneras.

Uno de estos métodos es la electrólisis del agua, la cual empezó a desarrollarse en la primera revolución industrial, en el año 1800, cuando Nicholson y Carlisle descubrieron la descomposición electrolítica del agua. Para llevar a cabo esta electrólisis se han diseñado 3 diferentes tipos de electrolizadores los cuales son los electrolizadores alcalinos, PEM (intercambio de protón membrana) y SOEC (de óxido sólido) (Mendoza, 2006).

La electrólisis alcalina es la tecnología de electrólisis más madura actualmente para aplicaciones a gran y pequeña escala. Esta se basa en el uso de un electrolito este electrolito empleado es una disolución acuosa de una base fuerte, típicamente NaOH o KOH. Este tipo de electrolitos es apropiado porque presenta una gran conductividad iónica (Fabrega & Rendé, 2020).

Un electrolizador alcalino es un dispositivo en el que se produce la electrólisis del agua en el seno de un medio alcalino. En el electrolizador se produce la reacción no espontánea de separar el agua en hidrógeno y oxígeno al hacer circular una corriente continua de una manera conveniente (Rafael, 2020).

Los electrolizadores alcalinos constan de varias celdas unitarias unidas entre sí en dos configuraciones posibles: monopolar o bipolar. En la configuración monopolar las celdas electrolíticas están conectadas eléctricamente en paralelo, de modo que todos los cátodos están conectados entre sí y al igual que los ánodos, pero tanto ánodos como cátodos están físicamente separados. Su temperatura normal de operación se encuentra entre los 60 y 90°C y la presión es cercana a la atmosférica (Fabrega & Rendé, 2020).

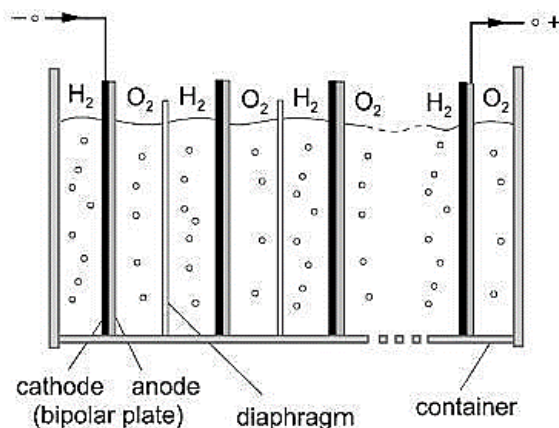


Figura 1. Electrolizador alcalino monopolar (García J. C., 2012).

Debido a los diferentes tipos de producción de hidrógeno este se ha clasificado según el origen de producción siendo esta una nomenclatura de 3 colores diferentes las cuales son: (ACCIONA, 2020)

- Hidrógeno Gris: Se obtiene mediante el reformado de combustibles fósiles, siendo el gas natural el más común.
- Hidrógeno Azul: Se obtiene de combustibles fósiles, pero con técnicas capaces de capturar y almacenar las emisiones de CO₂ que se producen.
- Hidrógeno Verde: Se obtiene mediante electrólisis del agua, pero se obtiene en sus totalidades por energías renovables.

El hidrógeno en su forma natural puede tener varios usos pues se puede utilizar como un vector energético, como materia prima en la industria o usar directamente como un combustible (Giménez, 2021), siendo este uso el de interés para esta investigación.

2.1 Combustión

La combustión se define como una rápida oxidación que genera calor o luz o ambas, y también como una lenta oxidación acompañada relativamente por un pequeño nivel de calor y nada de luz. (R, 2012). La combustión puede ocurrir en modo con llama o sin llama, y las llamas, a su vez, son categorizados como llamas premezcladas o llamas no premezcladas (difusión). Las dos clases de llamas, premezcladas y no premezcladas (o de difusión), están relacionadas al estado de mezcla de los reactivos, como lo sugieren sus nombres. En una pre-mezcla la llama, el combustible y el oxidante se mezclan a nivel molecular antes de que ocurra la combustión. Por el contrario, en una llama de difusión o no premezclada, los reactivos se separan inicialmente y la reacción ocurre sólo en la interfaz entre el combustible y el oxidante, donde tienen lugar tanto la mezcla como la reacción. Un ejemplo de llama de difusión es una simple vela. En dispositivos prácticos, ambos tipos de llamas pueden estar presentes en distintos grados (R, 2012).

La quema de hidrógeno es un proceso de combustión en el cual el hidrógeno reacciona con el oxígeno del aire para producir energía en forma de calor y vapor de agua. Esta reacción química es altamente exotérmica, lo que significa que libera una gran cantidad de energía en forma de calor cuando se produce (Roldán, 2023).

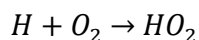
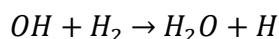
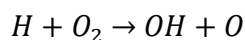
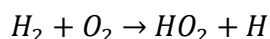
La molécula de hidrógeno es, en condiciones normales de presión y temperatura, un gas incoloro, inodoro, no tóxico e inflamable, con un punto de ebullición de $-252,77\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un punto de fusión de $-259,13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Puede reaccionar con oxígeno (O_2) desprendiendo energía y formando agua. Esta reacción se conoce como combustión y en ella el hidrógeno es el combustible (Junta de Castilla y León, 2021)



Ecuación 1. Reacción de combustión de Hidrógeno

En esta reacción, dos moléculas de hidrógeno (H_2) reaccionan con una molécula de oxígeno (O_2) para formar dos moléculas de agua (H_2O) y liberar energía en forma de calor.

Pero es importante considerar que esta tiene sub-reacciones para poder llegar hasta el final, las cuales son las siguientes:



Ecuación 2. Reacción de producción de Hidrógeno

En la literatura se han encontrado diferentes mecanismos de reacción para llevarse a cabo la reacción principal siendo una de estas la que se muestra en la siguiente tabla la cual además presenta algunos de los coeficientes recomendados para la ecuación de Arrhenius, mostrada en la Tabla 1.

$$k = A * e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Ecuación 3. Ecuación de Arrhenius

Tabla 1. Coeficientes recomendados para la reacción H₂-O₂ (J, 1984).

Reacción	A	b	E _a	Temperatura
	$\left(\frac{\text{cm}^3}{\text{gmol}}\right)^{\pi-1} / \text{s}^a$		(KJ/gmol)	(K)
H + O ₂ → OH + O	1.2*10 ¹⁷	-0.91	69.1	300-2500
OH + O → O ₂ + H	1.8*10 ¹³	0	0	300-2500
O + H ₂ → OH + H	1.5*10 ⁷	2.0	31.6	300-2500
OH + H ₂ → H ₂ O + H	1.5*10 ⁸	1.6	13.8	300-2500
H + H ₂ O → OH + H ₂	4.6*10 ⁸	1.6	77.7	300-2500
O + H ₂ O → OH + OH	1.5*10 ¹⁰	1.4	72.2	300-2500

En la Tabla 2 se muestra información con fines comparativos de uno de los combustibles más comunes como lo es el metano respecto al hidrógeno, para poder comprender algunas de las diferencias de sus propiedades:

Tabla 2. Propiedades de combustión del metano e hidrógeno (García & Amell, 2006)

Propiedad	Etanol	Hidrógeno	Metano
Peso molecular	46.07 g/mol	2.02 g/mol	16.04 g/mol
Volumen de humo seco	0.32 m ³ /kg	-	0.48 m ³ /kg
Volumen de CO ₂	1.92 m ³ /kg	0 m ³ /kg	2.75 m ³ /kg
Porcentaje máximo de CO ₂	19.1%	0%	9.5%
Volumen de agua	1.44 m ³ /kg	1.61 m ³ /kg	2.25 m ³ /kg
Poder calorífico superior volumétrico	23.4 MJ/L	12.1 MJ/m ³	39.8 MJ/m ³
Poder calorífico inferior volumétrico	21.2 MJ/L	10.8 MJ/m ³	35.8 MJ/m ³
Poder calorífico superior másico	29.7 MJ/kg	141.9 MJ/kg	55.5 MJ/kg
Poder calorífico inferior másico	26.8 MJ/kg	119.9 MJ/kg	50.0 MJ/kg
Índice de Wobbe inferior	26.8 MJ/m ³	43.9 MJ/m ³	50.7 MJ/m ³
Temperatura de rocío	-114°C	-252.9°C	-161.5°C
Límite inferior de inflamabilidad	3.3% vol.	4.0% vol.	5.0% vol.
Límite superior de inflamabilidad	19.0% vol.	75.0% vol.	15.0% vol.
Velocidad de deflagración	0.34 m/s	3.46 m/s	0.45 m/s
Calores específicos a 300K	C _p = 2.44 J/g·K (líquido)	C _p = 14.30 J/g·K (gas)	C _p = 2.22 J/g·K (gas)

2.2 Quemadores

Para el suministro de energía térmica en los procesos productivos se utilizan equipos de calentamiento directo o fuego indirecto, cuya energía térmica se obtiene a través de la quema de combustibles en hornos. Uno de los componentes más relevantes en los Hornos son los quemadores; los quemadores son los componentes de alta complejidad diseñados para mejorar la eficiencia de combustión mediante sistemas de control automático para el encendido y control de la operación (Abbasi, L., Wanke, & Hayes, 2022). Para poder distinguir de manera correcta la diferencia entre un quemador y un equipo llamado horno se presenta la Figura 2. Diagrama de diseño de un Horno típico, donde el diagrama completo representa el equipo de horno y de la notación numérica 04 en amarillo el parte inferior derecha, es el quemador.

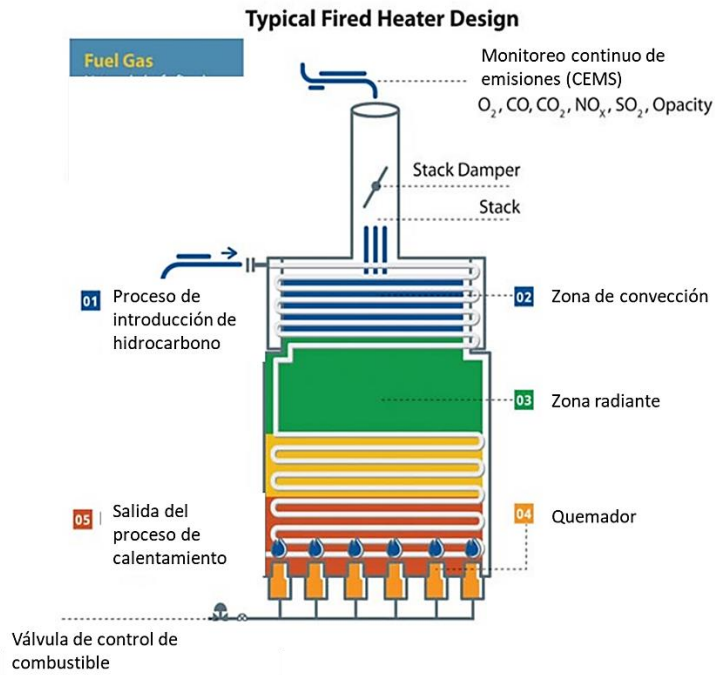


Figura 2. Diagrama de diseño de un Horno típico (YOKOGAMA, 2017)

Los quemadores tienen muy diversos usos desde calefacción, secado a llama directa y producción de vapor, hasta procesos químicos como la calcinación o la tostación, combustión de gases residuales, entre muchos otros. Los combustibles que se utilizan pueden ser sólidos (ej. carbón pulverizado, chips de aserrín), gaseosos (ej. gas natural, gas licuado) o líquidos (ej. petróleo, fuel oil) y pueden producir calor generalmente mediante una llama. Hay tres tipos de quemadores para gas en función de su diseño: Quemadores de difusión de llama, quemadores atmosféricos o con premezclado parcial y quemadores con llamas y premezclado total (Borghi & Desriau, 1998).

2.2.1 Tipos de quemadores

Tecnologías de quemadores de hidrógeno

La utilización del hidrógeno como fuente de energía limpia y sostenible requiere quemadores de hidrógeno. Los quemadores de hidrógeno son una opción atractiva para reducir el impacto ambiental porque, a diferencia de los quemadores de combustibles fósiles, no emiten gases de efecto invernadero.

Cada tecnología de quemador de hidrógeno tiene ventajas y desventajas. Las siguientes son algunas de las tecnologías más utilizadas:

1. Quemadores premezclados (Schmidt & Mukerjee, 2022):

- Estos quemadores mezclan hidrógeno y aire antes de quemar.
- Producen llamas más limpias y emiten menos NO_x que los quemadores de difusión.
- No obstante, son más costosos y complejos que los quemadores de difusión.

2. Quemadores catalíticos (Li, Wang, & Chen, 2021):

- Estos quemadores producen llamas muy limpias y con bajas emisiones de NO_x porque utilizan un catalizador para promover la combustión de hidrógeno a bajas temperaturas.
- Sin embargo, son los quemadores más costosos y complejos de los tres.

3. Quemadores de llama de torbellino (Khoshnood & Dryer, 2020):

- Para estabilizar la llama, estos quemadores utilizan un flujo de aire en forma de torbellino.
- Generan llamas compactas e intensas.
- Son adecuados para aplicaciones que requieren una transferencia de calor elevada.
- Sin embargo, en comparación con otros tipos de quemadores, pueden ser más ruidosos.

2.2.2 Quemador utilizado en el proyecto

En el caso de este trabajo de tesis se utilizó un quemador de tipo premezclado o pre-mezcla por lo que se indagara más sobre este tipo de quemadores en este punto.

En este tipo de quemadores se produce una primera entrada de aire al quemador inducido por el gas que está saliendo de un inyector. Esto genera una pre-mezcla de aire combustible en la tobera

del quemador. La mezcla puede variar según la entrada de aire deseada, y la velocidad de la misma es directamente proporcional a la velocidad de salida del gas. El aire secundario presente en la combustión, es el entrante por difusión del aire ambiente alrededor de la llama (Gómez & Llanos, 2013).

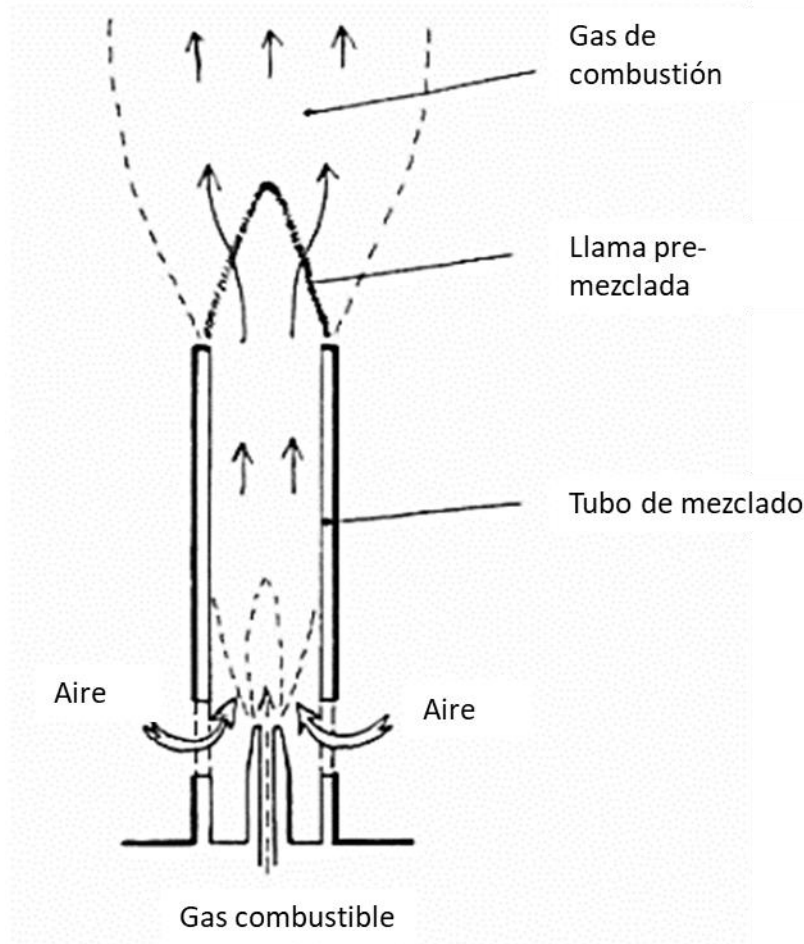


Figura 3. Diagrama de un quemador atmosférico

Los quemadores premezclados de hidrógeno emergen como una tecnología revolucionaria en el panorama energético, posicionándose como una alternativa limpia y sostenible a los combustibles fósiles tradicionales. A diferencia de los quemadores de difusión, que mezclan hidrógeno y aire de forma incompleta, los quemadores premezclados logran una mezcla total antes de la combustión, generando llamas más limpias, con menores emisiones de NO_x y una eficiencia energética superior (Resende, Morais, Pinho, & Afonso, 2022).

Ventajas:

Bajos niveles de emisiones de NOx: la mezcla completa y la combustión controlada reducen significativamente la producción de NOx, un contaminante atmosférico dañino que está relacionado con problemas respiratorios, lluvias ácidas y cambios climáticos. Esto los hace atractivos para aplicaciones que requieren una alta calidad del aire, como en áreas urbanas o cerca de ecosistemas sensibles (Md Nur Alam Mondal, 2023).

La llama limpia: la combustión completa libera hollín y otros contaminantes, lo que la hace ideal para aplicaciones en las que es importante la calidad de la combustión. Por ejemplo, esto evita que se produzcan sustancias nocivas en los alimentos en la industria alimentaria, mientras que en la fabricación de componentes electrónicos, protege los materiales de la contaminación (Wei Du, 2022).

Alta eficiencia: la combustión de hidrógeno eficiente reduce el consumo de combustible, reduce los costos operativos y maximiza la liberación de energía. Esto conduce a ahorros financieros y ambientales a largo plazo, especialmente en las industrias que consumen mucha energía (Wei Du, 2022).

Flexibilidad de combustible: Los quemadores premezclados pueden usar hidrógeno puro o mezclas de hidrógeno y gases naturales, lo que ofrece una mayor variedad de opciones de combustible. Esto permite una transición gradual hacia la energía del hidrógeno aprovechando la infraestructura de gas natural existente (Ozan, Mustafa, & Serhat, 2024).

Aplicaciones versátiles: Pueden usarse en una variedad de aplicaciones, como calderas, hornos industriales, turbinas de gas, celdas de combustible y procesos de tratamiento térmico. Como resultado de su versatilidad, son una tecnología crucial para la descarbonización de una variedad de sectores industriales (A, L, J, & Beesteheerde, 1996).

Ejemplos de aplicaciones (Hweeung & Bonchan, 2024):

- *Calefacción industrial:* el agua utilizada en el proceso de producción en una fábrica de papel se puede calentar con quemadores premezclados de hidrógeno, lo que reduce las emisiones de CO₂ y mejora la calidad del aire dentro de la fábrica.
- *Generación de energía:* el hidrógeno verde producido por la electrólisis puede ser utilizado por quemadores premezclados de hidrógeno para alimentar turbinas de gas en una central

eléctrica. Esto hace que la matriz energética sea más diversa y reduce la dependencia de los combustibles fósiles.

- *Celdas de combustible*: Los quemadores premezclados de hidrógeno proporcionan hidrógeno a las celdas de un vehículo eléctrico alimentado por celdas de combustible, que luego se convierte de manera eficiente y limpia en electricidad y agua, lo que promueve el transporte sostenible y reduce las emisiones de gases de escape.
- *Tratamiento térmico*: En la fundición de metal, los quemadores premezclados de hidrógeno pueden usarse para calentar los hornos de fusión y los hornos de tratamiento térmico, lo que reduce la formación de óxidos y mejora la calidad del metal fundido.
- *Secado*: En una planta de procesamiento de alimentos, los quemadores premezclados de hidrógeno pueden secar frutas, verduras y otros alimentos de manera rápida y uniformemente, manteniendo la calidad y el sabor del producto final.

Investigación y desarrollo (Miranda, 2018):

La tecnología de quemadores premezclados de hidrógeno continúa evolucionando, y los estudios actuales se centran en mejorar la eficiencia de la combustión mediante el desarrollo de nuevas técnicas como:

Mejorar la eficiencia de la combustión: reducir las pérdidas de calor y aumentar la liberación de energía de hidrógeno para maximizar el rendimiento energético y reducir aún más las emisiones de CO₂.

Reducir las emisiones: la creación de nuevos catalizadores y técnicas de combustión disminuye la producción de NO_x y otros contaminantes, lo que hace que el aire sea más limpio y seguro para el medio ambiente.

Crear diseños más pequeños y económicos: aumentar la adopción de la tecnología, reducir los costos y hacer que los quemadores premezclados sean más accesibles para una amplia gama de aplicaciones, especialmente para las pequeñas y medianas empresas.

Ampliar el alcance de las aplicaciones: Investigar nuevas aplicaciones para quemadores premezclados en industrias como la aeroespacial y el transporte marítimo, promoviendo la innovación y diversificando el uso de la tecnología en áreas con mayores retos de descarbonización.

2.2.3 Desempeño de un quemador

De acuerdo a una investigación en la cual se midió el desempeño de un quemador con la quema de cascarilla de arroz los parámetros de diseño de un quemador que desarrollan un proceso de combustión son los siguientes: (Varón, 2005)

- Continuidad de operación
- Sostenibilidad de temperatura
- Eficiencia energética
- Viabilidad económica
- Bajo impacto ambiental.

Estos parámetros se muestran en la Tabla 3 con sus indicadores, así como su forma de cálculo.

Tabla 3. Parámetros e indicadores de desempeño del quemador (Varón, 2005).

Parámetro	Indicador	Cálculo	Variable de salida
Eficiencia térmica	$\eta = \frac{Q}{\Delta H_0}$	Calculo de calor generado	Temperatura
Sostenimiento de Temperatura	$T = f(t)$	Temperatura vs Tiempo	Temperatura vs Tiempo
Continuidad del proceso de combustión	$\%Inq = \frac{m_{cascarilla}}{m_{ceniza}}$	Análisis gravimétrico de cenizas	Composición de cenizas
Bajo impacto ambiental	$\chi_{CO}, \chi_{NO}, \chi_{CO_2}, \chi_{SO_2}$	Análisis de gases de combustión	combustión de gases de combustión
Consumo de potencia	$W_{sa} = \frac{1}{\eta f v d P}$	Primera ley de termodinámica	Presión

La eficiencia energética del dispositivo es la relación entre el calor generado por el quemador, el cual es calculado por medio de la temperatura de llama medida en el quemador, y el poder calorífico del combustible. Este indicador permite cuantificar de manera porcentual la forma en la cual el dispositivo aprovecha la energía química contenida. La viabilidad económica del dispositivo está determinada por los costos de construcción, operación y mantenimiento del quemador como tal.

2.2.4 Algunas disposiciones para la aprobación de quemadores atmosféricos

Según el extractado de las normas de la AMERICAN GAS ASSOCIATION, (A.G.A).

- Los agujeros de salida deben ser perfectamente hechos a máquina o con procedimientos similares.
- La disposición de los quemadores debe ser de modo que deba ser fácilmente retirados y asegurarse que no puedan variar su posición.
- El obturador de aire debe ser fijado al mezclador en forma que regularse a voluntad. (entrada de aire primario).
- No debe producirse monóxido de carbono en las condiciones de ensayo
- Las llamas de los quemadores deben quemar libremente propagarse inmediatamente y quemar en todos los agujeros de salida cuando se encienda en un punto cualquiera (interencendido).
- No debe haber retroceso de llama encendida entre los 2 y 5 segundos después de abrir el paso o girando la llave hasta que el paso sea de 1/5 del normal) El gas no debe salir por el orificio u orificios de entrada del aire primario.
- La llama no debe ser apagada por un viento constante de 5 Km/hora

La mayoría de los quemadores actuales funcionan con gases como el propano, el butano y el gas natural. Ambos casos requieren la combustión del gas más ecológico, lo que resulta en emisiones de CO₂. Por otro lado, el hidrógeno es el combustible "perfecto" porque su combustión es completamente limpia, sin producir CO ni CO₂. Esto es particularmente atractivo para reducir las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero (Flórez, 2021).

Quemar hidrógeno o mezclas gaseosas altamente hidrogenadas presenta serios problemas, no resueltos en la actualidad salvo en la industria aeroespacial, pues además de ser un gas incoloro e inodoro, y por ello difícil de detectar, el hidrógeno es el combustible menos denso que existe (quince veces más ligero que el aire), con una conductividad térmica cinco veces superior al metano (constituyente fundamental del gas natural) y con una viscosidad ocho veces superior a éste. Además, para su combustión completa, el aire requerido es la cuarta parte del requerido por el

metano. Esta combinación de factores hace del hidrógeno un gas combustible muy “especial” (Meyer & Caneiro, 2004).

Por otro lado, la velocidad de combustión del hidrógeno es incomparablemente mayor que la de cualquiera de los gases combustibles habituales como se muestra en la Tabla 4. Por ello, la llama que produce presenta una enorme tendencia hacia el retroceso, es decir hacia la penetración de la misma en el quemador.

Tabla 4. Velocidades máximas de combustión en aire (Meyer & Caneiro, 2004)

Combustible	Símbolo	v_{MAX} de combustión en aire $\frac{cm}{s}$.
Hidrógeno	H_2	306
Metano	CH_4	39
Etano	C_2H_6	46
Propano	C_3H_8	45
Butano	C_4H_{10}	44

Para evitar este fenómeno indeseable es necesario encontrar una combinación adecuada de material y estructura, que impida el paso de la llama en caso de penetración en el quemador, junto con un diseño adecuado del mismo. Dicho diseño se basará, necesariamente en una combinación material-estructura con muy baja conductividad térmica, pasos de gas de muy pequeño diámetro y gran pérdida de carga. La única estructura que reúne estas condiciones es la espuma cerámica de poro pequeño (Marin, 2008).

En el laboratorio de combustión de Ikerlan se han ensayado dos combinaciones material-estructura, potencialmente adecuadas para la combustión de mezclas hidrogenadas con mezclas de hasta el 50% de H_2 en la mezcla H_2-CH_4 :

- Una espuma cerámica de Alzeta Corp (USA) no comercializada en la actualidad.
- Un sinterizado cerámico de Ecoceramics (NE), utilizado en la fabricación de filtros para la industria farmacéutica.

Como se mencionó anteriormente al ser principalmente la mayoría de los quemadores diseñados para otro tipo de combustibles la mayoría de los quemadores actuales se optan para el uso de una mezcla de estos con el hidrógeno como se puede ver en un resumen de las investigaciones previas en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen de estudios de quemadores en mezcla de H₂ (Restrepo, 2023).

Nombre	Tipo de llama	Régimen	Combustible	Tipo de análisis	H₂ (vol.-%)	Resultados Relevantes
Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame	No confinada	Turbulento	GN-H ₂	Experimental	0-10-20-30-40-50	El H ₂ estabiliza la llama y la acorta en altas proporciones aumenta la T de la llama, disminuye el CO ₂ , no hubo cambio de NO y CO.
Effects of hydrogen enrichment of methane on diffusion flame structure and emissions in a back-pressure combustion chamber	Confinada	Turbulento	CH ₄ -H ₂	Numérico y Experimental	0-5-10-15-20-25	Las llamas enriquecidas con H ₂ se acortan y ensanchan, para un 15% en H ₂ se disminuyen la formación de NO.
Characteristics of hydrogen-hydrocarbon composite fuel turbulent jet flames.	Confinada	Turbulento	GN-H ₂	Experimental	0-5-10-15-20-25	La producción de CO y hollín (en el eje axial) decrecen, e incremental el NO _x con la proporción de H ₂ . Disminuye la longitud de llama para los C _x H _y . Disminuye el flux radial, aumenta el flux total.
Emission and heat transfer characteristics of methane-hydrogen	Confinada	Laminar	CH ₄ -H ₂	Experimental	0-10-20-30-40-50	Incremento en NO _x , disminución en CO y CO ₂ . Aumento en flux total de calor .

hybrid fuel laminar diffusion flame	Confinada	Laminar	CH ₄ -H ₂ + aire enriquecido	Experimental0	0-10- 20-30- 40-50	Control del NOx para grandes proporciones de O ₂ (35%).
Experimental study on the effects of hydrogen addition on the emission and heat transfer characteristics of laminar methane diffusion flames with oxygen-enriched air						

2.3 Monitoreo de un quemador

El monitoreo efectivo de los quemadores de hidrógeno es crucial para garantizar la seguridad, el rendimiento óptimo y la longevidad de estos sistemas críticos. La naturaleza altamente combustible del hidrógeno exige un enfoque meticuloso para la detección y el control de parámetros clave, asegurando así una operación segura y confiable (Alptekin & Ichim, 2023).

Parámetros críticos a monitorear (Alptekin & Ichim, 2023):

- **Flujo de hidrógeno:** El monitoreo preciso del flujo de hidrógeno es esencial para mantener una combustión estable y eficiente. Los sensores de flujo precisos miden la cantidad de hidrógeno que ingresa al quemador, permitiendo ajustes en tiempo real para optimizar la combustión y minimizar el desperdicio de combustible.
- **Presión de hidrógeno:** La presión del hidrógeno influye directamente en la intensidad de la llama y la eficiencia de la combustión. Los sensores de presión monitorean la presión del hidrógeno en diferentes puntos del sistema, asegurando que se mantenga dentro de los rangos operativos seguros y óptimos.
- **Temperatura de la llama:** La temperatura de la llama es un indicador crucial de la eficiencia de la combustión. Los sensores de temperatura infrarrojos o termopares miden la temperatura de la llama, permitiendo detectar anomalías que podrían indicar una combustión incompleta o ineficiente.

- **Vibraciones:** Las vibraciones excesivas pueden indicar problemas mecánicos en el quemador o en el sistema de suministro de hidrógeno. Los sensores de vibración detectan vibraciones anormales, permitiendo identificar y abordar posibles fallas antes de que causen daños o interrupciones del funcionamiento.
- **Monitoreo de la llama:** Los sistemas de monitoreo de la llama utilizan cámaras o sensores ópticos para detectar la presencia, la estabilidad y la forma de la llama. Estos sistemas pueden alertar a los operadores sobre anomalías en la llama, como parpadeo, oscilación o extinción, permitiendo una intervención rápida para evitar situaciones peligrosas.

Tecnologías de monitoreo (Li, Li, & Wang, 2021):

- **Sensores:** Los sensores son dispositivos electrónicos que detectan y miden cambios en parámetros físicos como el flujo, la presión, la temperatura, la composición de los gases y las vibraciones. Los sensores modernos ofrecen alta precisión, confiabilidad y velocidad de respuesta, garantizando un monitoreo efectivo del quemador de hidrógeno.
- **Sistemas de control y adquisición de datos (SCADA):** Estos sistemas recopilan datos de los sensores y los procesan para presentar información en tiempo real a los operadores. Estos sistemas permiten visualizar tendencias, establecer alarmas y controlar el quemador de manera remota, optimizando la eficiencia y la seguridad.
- **Modelos de simulación:** Los modelos de simulación computacional pueden predecir el comportamiento del quemador de hidrógeno en diferentes condiciones operativas. Estos modelos ayudan a identificar posibles problemas, optimizar el diseño del quemador y desarrollar estrategias de control más efectivas.

Beneficios del monitoreo efectivo (D'Souza & Dryer, 2020):

- **Mejora de la seguridad:** el monitoreo continuo de los parámetros importantes del quemador de hidrógeno ayuda a detectar y prevenir fallas potenciales, lo que reduce el riesgo de accidentes e incendios.
- **Optimización del rendimiento:** el monitoreo ayuda a identificar y corregir las desviaciones en el rendimiento del quemador, lo que garantiza una combustión eficiente y reduce el consumo de hidrógeno.

- Reducción de emisiones: un monitoreo efectivo reduce las emisiones contaminantes como NO_x y CO, así como el impacto del quemador en el medio ambiente.
- Extensión de la vida útil del quemador: la detección y la intervención oportunas de problemas en el quemador reducen los costos de mantenimiento y prolongan su vida útil.
- Mejorar la toma de decisiones: los datos de monitoreo ayudan a tomar decisiones operativas, lo que permite optimizar el rendimiento del quemador y el manejo del sistema de hidrógeno.

Tomando como base los fenómenos energéticos relacionados con el quemador se identifican varios factores que influyen en la eficiencia y el rendimiento térmico del proceso de combustión. Algunos de estos factores los siguientes (Soto, 2002):

- Geometría de la cámara de combustión: El diseño y la geometría afecta el flujo, tiempo de residencia mezcla de combustible y oxidante, lo que en última instancia afecta la eficiencia de combustión.
- Análisis térmico: Un análisis térmico exhaustivo ayuda en la comprensión del calor, los mecanismos de transferencia dentro de la combustión. Este análisis considera factores como conducción de calor, convección y radiación, lo que permite a los ingenieros optimizar la combustión proceso para maximizar la conversión de energía.
- Diseño de la cámara de combustión: El diseño de la cámara de combustión, tiene influencias dentro de la eficiencia, estabilidad y emisiones. Factores como inyección de combustible, mezcla de aire y combustible, así como el control de turbulencia son considerados durante el proceso de diseño para lograr rendimiento de combustión óptimo.
- Análisis de transferencia de calor: Entender el calor y las características de transferencia dentro la combustión es crucial para mantener la distribución de temperatura deseada y evitar puntos calientes.
- Eficiencia de combustión: Esta eficiencia de combustión se refiere a el porcentaje de energía de combustible que se convierte en energía térmica útil.

- Distribución de flujo: Logrando uniforme distribución del flujo de combustible y oxidante dentro la combustión La cámara es esencial para una combustión consistente y eficiente.
- Distribución de temperatura: Controlar la distribución de la temperatura dentro la cámara de combustión es crucial para mantener las condiciones de funcionamiento deseadas y previniendo daño térmico a las paredes de la cámara.

2.3.1 Termopares

Una forma muy eficiente para medir la temperatura son los termopares. Los termopares se forman uniendo dos materiales de naturaleza distinta mediante una soldadura o fusión, esta unión es el elemento del termopar que se debe de poner en contacto con el medio que se va a medir. En el campo de la instrumentación, las mediciones de temperatura son de lo más común, el termopar es por mucho el sensor de temperatura más usado en la industria por diferentes razones, como el amplio intervalo de temperatura de uso, su robustez, la buena exactitud, rápida respuesta a cambios de temperatura, versatilidad de uso y bajo costo (Evaristo, 1979).

El termopar fue descubierto por Thomas Seebeck en 1831. Seebeck descubrió que una corriente eléctrica fluía en un circuito cerrado de dos metales distintos cuando una de las uniones era calentada. La magnitud y dirección de la corriente son función de la diferencia de temperatura de las uniones y de las propiedades térmicas de los metales usados en el circuito. A este fenómeno se le conoce como efecto Seebeck (OMEGA TM, 2013).

Existen diferentes tipos de termopares y estos se clasifican de acuerdo a su rango de temperatura y sus aleación o combinación de metal que este tiene, los diferentes tipos de Termopares son los siguientes (JM Industrial Technology , 2024):

- Tipo J. Utilizan una combinación de Hierro – Constantan (una aleación de cobre y níquel). Tiene un rango de 0° C a 750° C. Su uso es limitado en entornos oxidantes a altas temperaturas y no se recomienda para las temperaturas bajas.
- Tipo K. Cuentan con una combinación de Chromega (aleación de níquel y cromo) – Alomega (aleación de níquel y aluminio). Con un rango de medición de -200° C a 1 250° C. Tiene un uso limitado en vacío o atmósferas reductoras. Dispone de un amplio rango de temperatura, la cual es la calibración más popular.

- Tipo T. Combinación de Cobre – Constatan. Su rango de temperatura es de -250°C a 350°C . Sus materiales son ligeramente oxidantes. Es muy efectivo en condiciones de humedad presente. Su aplicación es en procesos a temperaturas bajas y criogénicas.
- Tipo E. Fabricado de Chromega – Constatan. Con amplio rango de temperatura que va de -200°C a 900°C . Tiene un uso limitado en el vacío o atmósferas reductoras. Cuenta con el cambio más alto por grado.
- Tipo N. Utiliza una combinación de Omega-P (aleación de níquel, cromo y silicio) – Omega-N (aleación de níquel, silicio y magnesio). Su rango de temperatura es de -270°C a $1\ 300^{\circ}\text{C}$. Es utilizado como alternativa al tipo K, puesto que es más estable a temperaturas altas.
- Tipo R. Usa metales preciosos. En combinación Platino/13% Rodio – Platino. Su rango de temperatura es de 0°C a $1\ 450^{\circ}\text{C}$. Es de los más costosos. No debe ser insertado en tubos metálicos. Son diseñados para temperaturas altas.
- Tipo S. Utiliza los mismos metales preciosos que el tipo R, pero en distinta combinación: Platino/10% Rodio – Platino. Tiene un rango de temperatura de 0°C a $1\ 400^{\circ}\text{C}$. Al igual que el tipo R no debe insertarse en tubos metálicos u está diseñado para altas temperaturas.
- Tipo U. Diseñado con una combinación de Cobre – Cobre/bajo Níquel. Tiene un rango bajo de temperatura: 0°C a 50°C . Cuenta con un cable de conexión de grado de extensión para termopares tipo R y tipo S, también conocido como cable de extensión RX y SX.
- Tipo B. Al igual que el tipo R y tipo S, utiliza metales preciosos, en la combinación: Platino/30% Rodio – Platino/6% Rodio. Diseñado para altas temperaturas con un rango que va de 0°C a $1\ 700^{\circ}\text{C}$. No debe ser insertado en tubos metálicos. Su uso más común es en la industria del vidrio.
- Tipo G. Fabricado con una combinación de Tungsteno – Tungsteno/26% Renio. Con un rango de temperatura de 0°C a $2\ 320^{\circ}\text{C}$. Se debe tener cuidado en su uso, puesto que sus materiales son frágiles. No es muy práctico para temperaturas menores a 399°C y no es apto para su uso en atmósferas oxidantes.

- Tipo C. También es un termopar a base de tungsteno. La combinación de metales que usa es: Tungsteno/5% Renio – Tungsteno/26% Renio. Tiene el mismo rango de temperatura que el tipo G (0° C a 2 320° C). Su uso se recomienda únicamente para temperaturas muy altas y en atmósferas no oxidantes.
- Tipo D. Usa una combinación de Tungsteno/3% Renio – Tungsteno/25% Renio, con un rango de temperatura de 0° C a 2 320° C.

A continuación, se presenta la Tabla 6 con los termopares más comunes y sus rangos típicos:

Tabla 6. Clasificación de termopares más comunes (OMEGA TM, 2013).

Termopares más comunes y sus rangos de temperatura			
Tipo	Rangos de Temperatura	Límites estándar de error	Límites de errores específicos
J	0°C a 750°C	2.2°C o 0.75%	1.1°C o 0.4%
K	-200°C a 1250°C	2.2°C o 0.75%	1°C o 0.4%
E	-200°C a 900°C	1.7°C o 0.5%	1°C o 0.4%
T	-250°C a 350°C	1°C o 0.75%	0.5°C o 0.4%

2.3.2 ARDUINO

En cuanto al acoplamiento de estos termopares la gran mayoría de estos necesitan algún módulo o sistema de interpretación electrónico que pueda hacer los cálculos para obtener los valores de temperatura deseados, por lo que a nivel laboratorio el uso del software Arduino es muy popular para estos y otros tipos de proyectos.

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes tipos de uso (Fernández, 2022).

El software libre son los programas informáticos cuyo código es accesible por cualquiera para que quien quiera pueda utilizarlo y modificarlo. Arduino ofrece la plataforma Arduino IDE (Entorno

de Desarrollo Integrado), que es un entorno de programación con el que cualquiera puede crear aplicaciones para las placas Arduino, de manera que se les puede dar todo tipo de utilidades. En este caso al ser de fácil acceso y al contar con los módulos necesarios para nuestro uso, así como las librerías que este tiene se optó por poder ocupar este software por contar con estos beneficios de software libre y su fácil acceso a la plataforma.

El microcontrolador de Arduino posee lo que se llama una interfaz de entrada, que es una conexión en la que podemos conectar en la placa diferentes tipos de periféricos. La información de estos periféricos que se conecten se trasladará al microcontrolador, el cual se encargará de procesar los datos que le lleguen a través de ellos.

El tipo de periféricos que se pueden utilizar para enviar datos al microcontrolador depende en gran medida de qué uso se le piense dar. Pueden ser cámaras para obtener imágenes, teclados para introducir datos, o diferentes tipos de sensores.

2.4 Análisis Térmico de quemadores

El análisis térmico de los quemadores de hidrógeno ha evolucionado de ser una simple evaluación de temperatura a una herramienta integral para comprender, optimizar y controlar estos sistemas críticos, impulsando su eficiencia, rendimiento y sostenibilidad. Este análisis va más allá de la simple medición de la temperatura, adentrándose en la distribución espacial, la transferencia de calor y la formación de productos de combustión, proporcionando información invaluable para el diseño, la operación y el mantenimiento de los quemadores (Li, Wang, & He, 2023).

Objetivos del análisis térmico:

- Comprender la distribución de temperatura: Dentro del quemador, incluyendo la llama, los componentes y las paredes circundantes. Es crucial para evaluar la eficiencia de la transferencia de calor y para identificar posibles puntos calientes que podrían afectar la vida útil del quemador. El análisis térmico ayuda a visualizar esta distribución, permitiendo a los ingenieros optimizar la geometría del quemador y la distribución del combustible para maximizar la transferencia de calor útil y minimizar la formación de zonas con temperaturas excesivas. En el diseño de un quemador de hidrógeno para una aplicación industrial, el análisis térmico puede revelar la presencia de puntos calientes en la zona de combustión, donde la temperatura supera el límite de tolerancia de los materiales del quemador. Esta información permite modificar la geometría del quemador, como la forma de la llama o la posición de los orificios de

combustible, para distribuir mejor el calor y evitar el sobrecalentamiento, prolongando así la vida útil del quemador (Hweeung & Bonchan, 2024).

- Evaluar la transferencia de calor del quemador al medio ambiente, a través de la convección, la radiación y la conducción, es un factor determinante en la eficiencia del sistema. El análisis térmico permite cuantificar esta transferencia, identificando los mecanismos dominantes y evaluando la influencia de factores como la geometría del quemador, el material de construcción y las condiciones de operación. Esta información es fundamental para optimizar el diseño del quemador y para maximizar la eficiencia térmica, reduciendo así el consumo de hidrógeno y las emisiones contaminantes (Liu, Li, & Wang, 2022).
- Predecir la formación de productos de combustión: La composición de los productos de combustión, incluyendo gases como CO₂, CO, NO_x y H₂O, tiene un impacto significativo en el rendimiento del quemador y en el medio ambiente. El análisis térmico ayuda a predecir la formación de estos gases, permitiendo evaluar las emisiones contaminantes y el cumplimiento de las normas ambientales. Esta información es crucial para el diseño de quemadores de hidrógeno sostenibles y para la optimización de las condiciones de combustión para minimizar la generación de gases nocivos (Chen, Zhu, & Wang, 2021).
- Optimizar el diseño del quemador: Aquí el análisis térmico juega un papel fundamental, desde la geometría y los materiales de construcción hasta el sistema de suministro de combustible. Al evaluar la distribución de temperatura, la transferencia de calor y la formación de productos de combustión, los ingenieros pueden tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia, reducir las emisiones, prolongar la vida útil del quemador y asegurar un funcionamiento seguro y confiable (Kaushik & Ranjan, 2020).

Métodos de análisis térmico:

- Análisis experimental: Este método implica la realización de pruebas en un quemador real para medir parámetros como la temperatura, la composición de los gases de escape y la transferencia de calor. Si bien proporciona datos precisos y confiables, puede ser costoso y lento, limitando su aplicación a casos específicos (Xu, y otros, 2020).
- Análisis numérico: Este método utiliza simulaciones computacionales para modelar el comportamiento del quemador y predecir su rendimiento térmico. Las técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics) y la simulación química permiten analizar la distribución de temperatura, la transferencia de calor, la formación de productos de combustión y otros

parámetros relevantes. El análisis numérico ofrece una herramienta flexible y rentable para evaluar diferentes diseños y condiciones de operación (Öztuma & Büyükakin, 2019).

Aplicaciones del análisis térmico:

- El diseño de los quemadores de hidrógeno es el siguiente: El análisis térmico es una herramienta crucial para diseñar quemadores de hidrógeno confiables, eficientes y sostenibles. La geometría del quemador, la distribución del combustible, el sistema de suministro de aire y los materiales de construcción se pueden optimizar para maximizar la transferencia de calor, minimizar las emisiones y prolongar la vida útil del quemador (Alptekin & Ichim, 2023).
- Operación y optimización de quemadores: El análisis térmico se utiliza para evaluar el rendimiento de los quemadores de hidrógeno mientras están en operación y para encontrar áreas de mejora. Permite monitorear la distribución de temperatura, la transferencia de calor y la formación de productos de combustión, lo que permite ajustar las condiciones de operación para optimizar la eficiencia, reducir las emisiones y garantizar un funcionamiento seguro. El análisis térmico puede utilizarse en la operación de un quemador de hidrógeno para una aplicación para monitorear la distribución de la temperatura dentro del quemador y para identificar puntos calientes potenciales que podrían afectar su rendimiento o vida útil. Se pueden ajustar las condiciones de operación, como la cantidad de combustible o aire, utilizando esta información para maximizar la combustión y minimizar la formación de áreas de altas temperaturas (A, L, J, & Beesteheerde, 1996).
- Diagnóstico de fallas en quemadores: Los quemadores de hidrógeno pueden tener fallas detectadas mediante análisis térmico. Al analizar la distribución de temperatura y la composición de los gases de escape, se pueden encontrar problemas como obstrucciones en los orificios de combustible, fugas de aire, combustión incompleta o sobrecalentamiento del quemador. En el diagnóstico de una falla en un quemador de hidrógeno para una aplicación de calefacción doméstica, el análisis térmico puede indicar la presencia de una obstrucción en uno de los orificios de combustible, lo que provoca una distribución desigual de la llama y una combustión incompleta. Esta información ayuda a identificar la causa de la falla del quemador y a tomar las medidas correctivas necesarias para que el quemador funcione de nuevo correctamente (Darwish, 2013).
- Desarrollo de nuevos combustibles y tecnologías de combustión: El análisis térmico es crucial para el desarrollo de nuevas tecnologías de combustión para quemadores de hidrógeno. Permite evaluar el comportamiento térmico de estos nuevos combustibles y tecnologías, identificando

sus beneficios y desventajas en comparación con las tecnologías convencionales (Boushaki, Dhué, Selle, Ferret, & Poinso, 2012). En el desarrollo de un nuevo combustible para quemadores de hidrógeno con un menor contenido de carbono y una mayor eficiencia de combustión, el análisis térmico puede utilizarse para evaluar la distribución de temperatura, la transferencia de calor y la formación de productos de combustión en comparación con el combustible convencional. Utilizando esta información, la composición y las condiciones de combustión del nuevo combustible se pueden optimizar para maximizar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes (Ozan, Mustafa, & Serhat, 2024).

Herramientas para el análisis térmico (Restrepo, 2023):

- Software de CFD (Computational Fluid Dynamics): Permite simular el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las reacciones químicas dentro del quemador, proporcionando una visión detallada de la distribución de temperatura, la transferencia de calor y la formación de productos de combustión.
- Software de simulación química: Permite modelar las reacciones químicas que ocurren durante la combustión del hidrógeno, proporcionando información sobre la formación de productos de combustión como CO_2 , CO , NO_x y H_2O .
- Instrumentación para la medición de temperatura: Permite medir la distribución de temperatura dentro del quemador y en sus alrededores.
- Analizadores de gases: Permiten medir la composición de los gases de escape, incluyendo la concentración de CO_2 , CO , NO_x y H_2O .

Consideraciones para el análisis térmico (Hweeung & Bonchan, 2024):

- Precisión de los modelos numéricos: La precisión de los modelos numéricos depende de la calidad de la malla computacional, las propiedades termodinámicas de los materiales y la precisión de las ecuaciones de combustión.
- Validación experimental: Los modelos numéricos deben validarse con datos experimentales para garantizar su precisión y confiabilidad.
- Interpretación de los resultados: La interpretación de los resultados del análisis térmico requiere una comprensión profunda de los principios de la transferencia de calor, la combustión y la química

Capítulo 3 METODLOGÍA

3 Metodología

En nuestro caso de estudio se ocupa un electrolizador alcalino mono polar. Para su operación se necesita seguir una serie de pasos la cuales se describen a continuación:

1. Preparación de la solución: El electrolito ocupado es NaOH con una concentración de 2 Molar, esta solución es introducida dentro del reactor.
2. Reactor (Rx): El reactor está compuesto por celdas de acero inoxidable las cuales sirven para poder conducir de mejor manera la corriente eléctrica cada una de estas celdas contiene un polo negativo o positivo la cuales separan el hidrógeno del oxígeno para así poder llevar a cabo la reacción de electrólisis.
3. Alimentación de Corriente Eléctrica: Al reactor se suministra una corriente eléctrica para poder llevar a cabo la electrolisis, esta es suministrada a cada una de las celdas.
4. Reacción de electrolisis: En esta etapa como se muestra en la Figura 4 podemos observar nuestro reactor siendo este donde se realiza la reacción de electrolisis la cual produce nuestro combustible hidrógeno y oxígeno.
5. Tanque de Burbujeo: El combustible producido pasa por la sección C1 la cual es una tubería conectada a nuestro tanque de burbujeo, este tanque está diseñado para funcionar como un sistema de seguridad el cual contiene agua dentro de sí, esto para evitar que en el caso que la flama del quemador regrese se detenga en este tanque y evite algún accidente mayor. De igual forma cuenta con un sistema de seguridad en donde al llegar a su capacidad máxima la corriente eléctrica es quitada para para la reacción de electrolisis y así también evitar un aumento en la presión del gas.
6. Quemado: Una vez dentro del tanque de burbujeo nuestro gas combustible pasa por la sección C2 de la Figura 4, la cual es otra tubería conectada con el quemador para así poder iniciar nuestro proceso de combustión.
7. Combustión de Hidrógeno: Para poder iniciar la reacción de combustión del hidrógeno es necesario una chispa que inicie la reacción encendiendo la flama de hidrógeno.

La Figura 4. Diagrama de Electrolizador y Quemador muestra e todos los componentes mencionados.

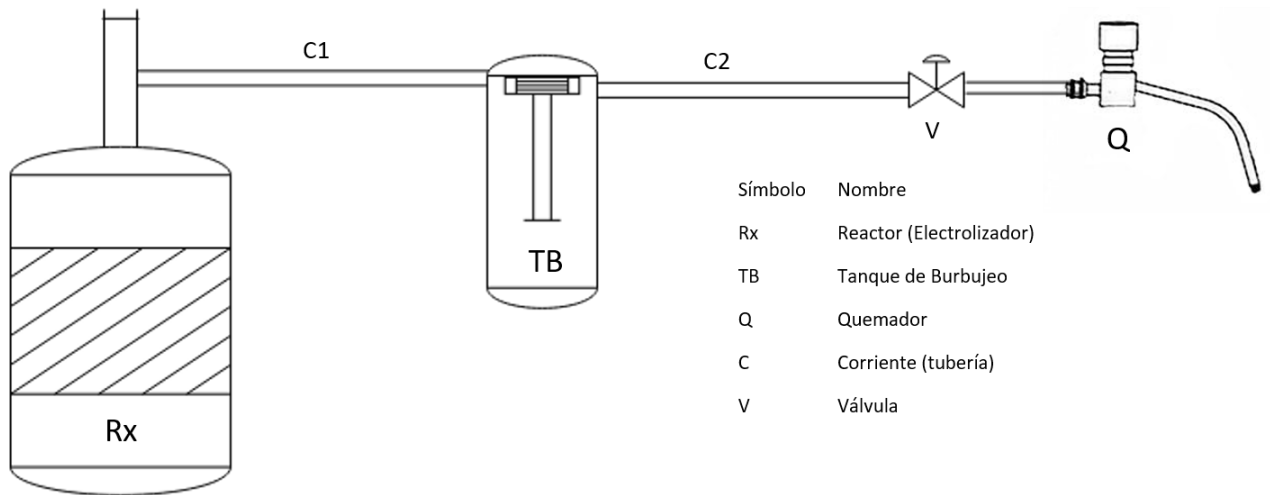


Figura 4. Diagrama de Electroлизador y Quemador

3.1 Metodología objetivo 1 Instrumentación

Para realizar la selección de la instrumentación del sistema de monitoreo se realizaron los siguientes pasos:

1. *Identificación de Parámetros Clave:* Se identificaron los parámetros críticos relacionados con la temperatura que deben ser monitoreados en el sistema, como lo son geometría de cámara de combustión la cual está dada por nuestro volumen de trabajo siendo este de forma cilíndrica, las temperaturas máximas alcanzables por la flama medida en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) siendo esta de aproximadamente 2000°C , así como alturas máximas y mínimas de la flama siendo la altura mínima a 5 cm y una máxima de 7 cm
2. *Evaluación de Requisitos de Medición:* Se determinaron los requisitos específicos de medición para la temperatura, incluyendo el rango de temperatura a medir, la precisión necesaria, la resolución deseada y la frecuencia de muestreo requerida. La cual es mostrada en la

Tabla 7. Requisitos de medición.

Parámetro	Rango de Temperatura	de Precisión Necesaria	Resolución Deseada	Frecuencia de Muestreo
Temperatura de la llama	20- 2000°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	0.5°C	1 Hz (1 vez por segundo)

3. *Investigación de Tecnologías de Instrumentación:* Se llevó a cabo una investigación sobre las diferentes tecnologías de instrumentación disponibles para medir la temperatura obteniendo los siguientes datos.
4. *Consideración de la Integración con el Sistema de Control:* Se evaluó cómo se integrarán los instrumentos de medición de temperatura con el sistema de control del sistema.
5. *Evaluación de Costos y Disponibilidad:* Se evaluaron los costos y la disponibilidad de los diferentes instrumentos considerados para medir la temperatura obteniendo como resultado lo mencionado anteriormente utilizando termopares tipo K pues estos son de un relativo bajo costo y con una disponibilidad amplia para adquirirlos y que este experimento sea realizado varias en otras condiciones.
6. *Realización de Pruebas en Sitio:* Se realizaron pruebas y evaluaciones en el sitio utilizando los diferentes instrumentos de medición de temperatura para determinar su desempeño en condiciones reales.

3.2 Metodología objetivo 2 Programación

Para poder obtener un monitoreo fiable de la temperatura de combustión de hidrógeno se utilizó como base el software ARDUINO en el cual se realizó la programación general para el monitoreo. Se usaron termopares del tipo K, capaces de monitorear temperaturas hasta los 1360°C, y un módulo MAX 6675 siendo este un convertidor analógico a digital (ADC) específicamente diseñado para medir la temperatura en aplicaciones que utilizan termopares. Para su funcionamiento el MAX6675 se conecta a un termopar, que es un sensor de temperatura basado en la generación de una pequeña tensión eléctrica proporcional a la temperatura, convierte la señal analógica del termopar en una señal digital que puede ser leída por un microcontrolador como Arduino. Proporciona la temperatura en grados Celsius con una resolución de 0.25°C. Sus conexiones físicas constan de 3 pines digitales principales los cuales son los siguientes: CS, SCK y DO. Además de estos necesita las conexiones tanto a tierra (GND) y alimentación (VCC) respectivamente.

En el software de ARDUINO se realizó la programación correspondiente para la creación del código de lectura de 6 termopares del tipo K con sus módulos MAX6675, el código se basa principalmente en el uso de la librería descargable del módulo siendo este como resultado la lectura de los termopares en grados Celsius considerando esta la medida más comprensible y usable dentro de nuestro país.

En la Figura 5. Diagrama de conexión de termopares y placa Arduino, podemos observar el diagrama completo de cómo están conectados estos.

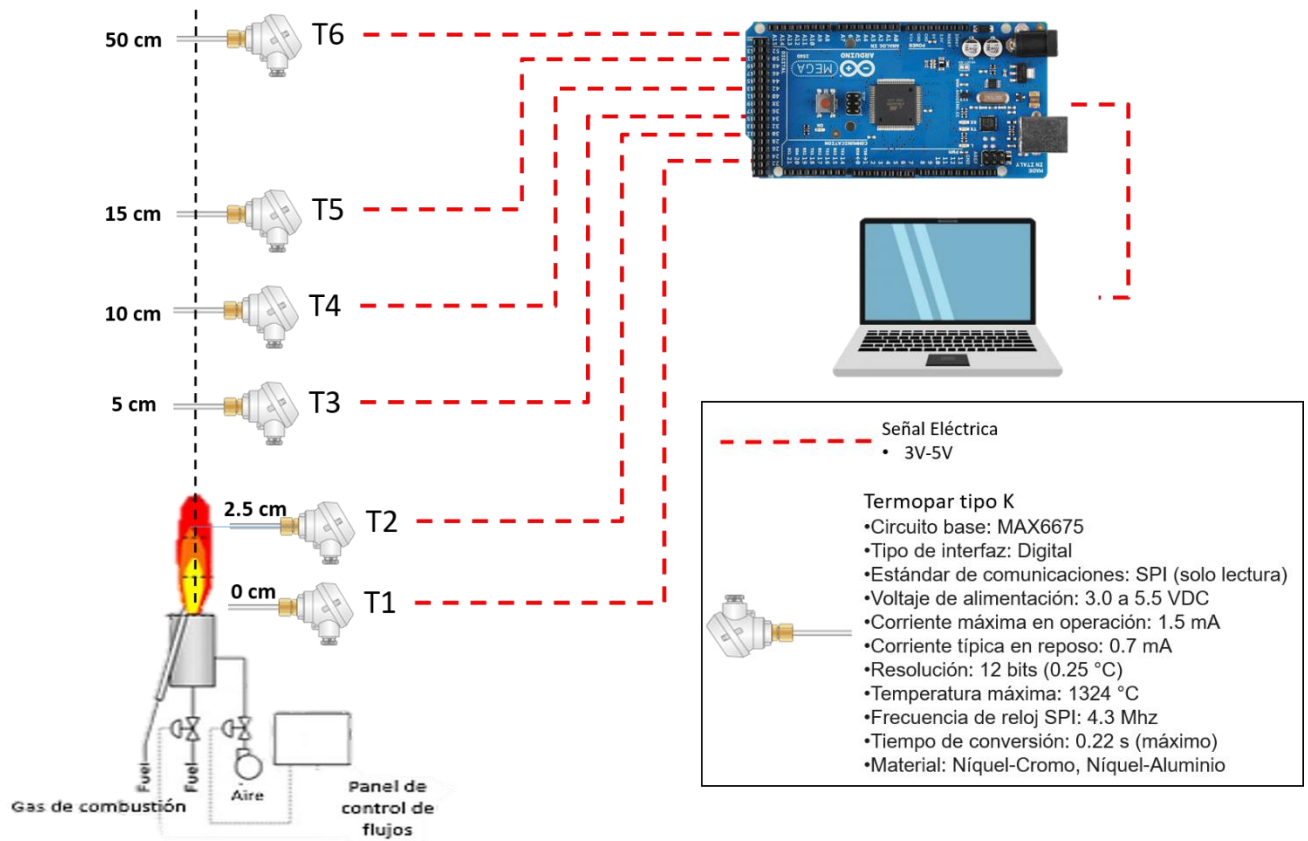


Figura 5. Diagrama de conexión de termopares y placa Arduino

3.2.1 Metodología objetivo 3 Interfaz

El análisis y la visualización de datos de temperatura en tiempo real son fundamentales para el monitoreo y control de quemadores de hidrógeno. Simulink, una herramienta de modelado y simulación de MATLAB, ofrece un entorno versátil para desarrollar interfaces personalizadas para el procesamiento y la visualización de datos. Esta tesis presenta una metodología ampliada para el diseño e implementación de una interfaz de este tipo, utilizando exclusivamente datos de temperatura medidos por termopares.

3.2.1.1 Recopilación y análisis de datos:

- La interfaz tiene como objetivo principal el monitoreo en tiempo real y continuo de la temperatura en diferentes puntos del quemador de hidrógeno, permitiendo detectar anomalías de manera inmediata y optimizar el proceso de combustión de manera dinámica.
- Los datos de temperatura se obtienen de seis termopares de alta precisión ubicados en la zona de combustión del quemador. Cada termopar proporciona datos de temperatura en grados Celsius con una frecuencia de muestreo de 1 segundo, lo que permite una representación precisa y detallada de la evolución de la temperatura.
- Los datos de temperatura presentan un rango de operación entre 0 °C y 1300 °C, cubriendo el rango completo de temperaturas relevantes para el proceso de combustión. La precisión de los termopares es de ± 1 °C, garantizando la confiabilidad de la información.

3.2.1.2 Diseño de la interfaz en Simulink:

- Creación de modelo. Se construye un modelo de Simulink modular y escalable, compuesto por tres bloques principales:
 - Bloque de adquisición de datos. Lee los datos de temperatura de los seis termopares utilizando el bloque "From File" mejorado de Simulink. Este bloque se configura para leer en tiempo real un archivo de texto que contiene los datos de temperatura actualizados.
 - Bloque de procesamiento de datos. En este bloque lee y filtra los datos dependiendo de los parámetros que necesitemos trabajar como la temperatura para saber cómo interactuar conforme nosotros lo deseemos, así como los cálculos necesarios para determinar el porcentaje de error que tienen cada uno de los termopares con respecto a la temperatura en estado estacionario, tanto como los cálculos necesarios para obtener la eficiencia del quemador de hidrógeno.
 - Bloque de visualización de datos. Muestra las temperaturas procesadas de los seis termopares en tiempo real utilizando un bloque "Scope" mejorados de Simulink. El bloque se configura para mostrar una gráfica de líneas interactiva con escalas, etiquetas y controles de zoom y desplazamiento personalizables, además de ello se ocupa un gráfico de medio gauge para mostrar de forma dinámica el movimiento de la temperatura, así como un indicador LED donde se visualiza si está trabajando dentro de

nuestra temperatura de operación o si esta fuera del límite con colores diferentes. De igual forma se utiliza la herramienta de gráficos donde se visualiza cada uno de los porcentajes de error, así como la eficiencia del quemador con respecto al tiempo.

3.2.1.3 Implementación de la interfaz

3.2.1.4 Eficiencia del quemador

- Configuración de bloques: Se configuran los parámetros de cada bloque de Simulink de acuerdo con los requisitos específicos del análisis y la visualización de datos.

Se inicia con un bloque para adquirir los datos de las lecturas de los termopares esto con un bloque dentro de simulink para leer los datos de un archivo de Excel obteniendo así las lecturas de los termopares. Con estas lecturas se procede a los primeros bloques de cálculo donde se realiza los cálculos necesarios para el funcionamiento de la luz led indicadora de que los termopares están trabajando en su rango de trabajo óptimo esto haciendo una comparación de un bloque lógico donde se compara el valor leído por el termopar contra un 10% de menos de la cantidad de lectura máxima que este puede tener siendo un aproximado de 1100°C para así indicar en luz verde que está dentro del rango, una luz naranja si se acerca a su rango máximo de trabajo y una luz rojo si está en del rango máximo de trabajo.

El segundo bloque de cálculos es para poder determinar la eficiencia del quemador esta es tomada de la Tabla 3. Parámetros e indicadores de desempeño del quemador . Esta secuencia de cálculos se resumen en la Figura 6. Y se extiende la explicación a continuación

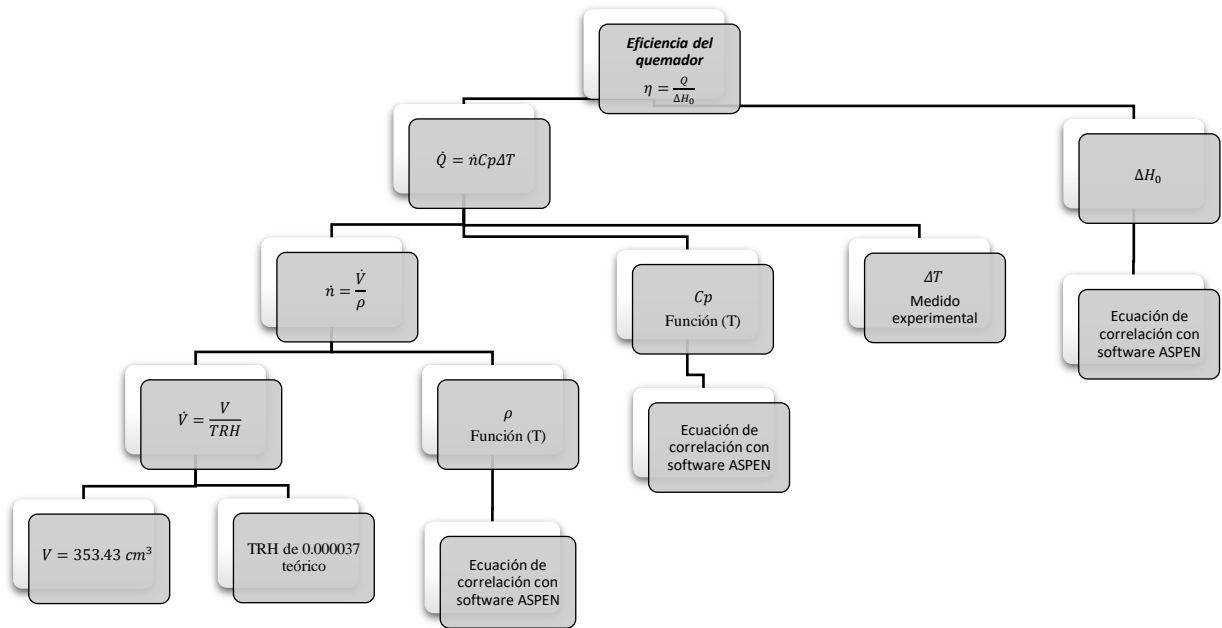


Figura 6. Secuencia de cálculo Eficiencia Quemador

$$\eta = \frac{Q}{\Delta H_0}$$

Ecuación 4. Eficiencia Térmica

Donde

Q = Flux de calor

ΔH_0 = Entalpia de Reacción

Inicialmente de acuerdo con la primera ley de la termodinámica podemos ocuparla y aplicarla en nuestro caso para poder obtener el valor de Q resultando en la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{n}C_p\Delta T \quad [J * mol^{-1}]$$

Ecuación 5. Balance de Energía Flux de Calor

Donde

\dot{n} = Flujo Molar

C_p = Capacidad Calorífica del Aire

ΔT = Delta de Temperaturas

Para poder determinar el flujo molar es necesario el uso de otra ecuación pues no tenemos una medición experimental de este flujo molar. La ecuación es la siguiente:

$$\dot{n} = \frac{\dot{V}}{\rho} [mol * s^{-1}]$$

Ecuación 6. Flujo Molar

Donde

\dot{V} = Flujo Volumétrico

ρ = Densidad del aire

Ahora en cuanto el cálculo del Flujo volumétrico lo podemos obtener de la siguiente ecuación

$$\dot{V} = \frac{V}{TRH} [cm^3 * s^{-1}]$$

Ecuación 7. Flujo Volumétrico

Donde

V = Volúmen

TRH = Tiempo de Retención Hidráulica

Ahora iniciamos calculando el Volúmen de nuestro Volúmen de trabajo donde obtenemos los siguientes resultados

Tabla 8. Calculo del Volúmen

r	1.5 cm
d	3 cm
h	50 cm
V	353.43 cm³

Ahora ya conociendo el Volúmen de trabajo procedemos a indicar un TRH teórico para poder continuar con los demás cálculos en este caso hacemos la suposición de un TRH de 0.000037 segundo

Con esto podemos continuar nuestros cálculos para obtener el Flujo volumétrico con la Ecuación 7. Flujo Volumétrico obteniendo como resultado

$$\dot{V} = \frac{353.43}{0.00003} [cm^3 * s^{-1}]$$

$$\dot{V} = 9552162.16 [cm^3 * s^{-1}]$$

Teniendo ya el flujo volumétrico se puede calcular el Flujo Molar con la Ecuación 6. Flujo Molar. Sin embargo, sabemos que la densidad del aire es una función con respecto a la temperatura, para poder obtener esta función fue necesario el uso del simulador ASPEN PLUS V8.8 en el cual se graficaron los datos de la densidad del aire como se muestra en la Figura 7. Grafica de la Densidad del aire ASPEN PLUS V.8.8.

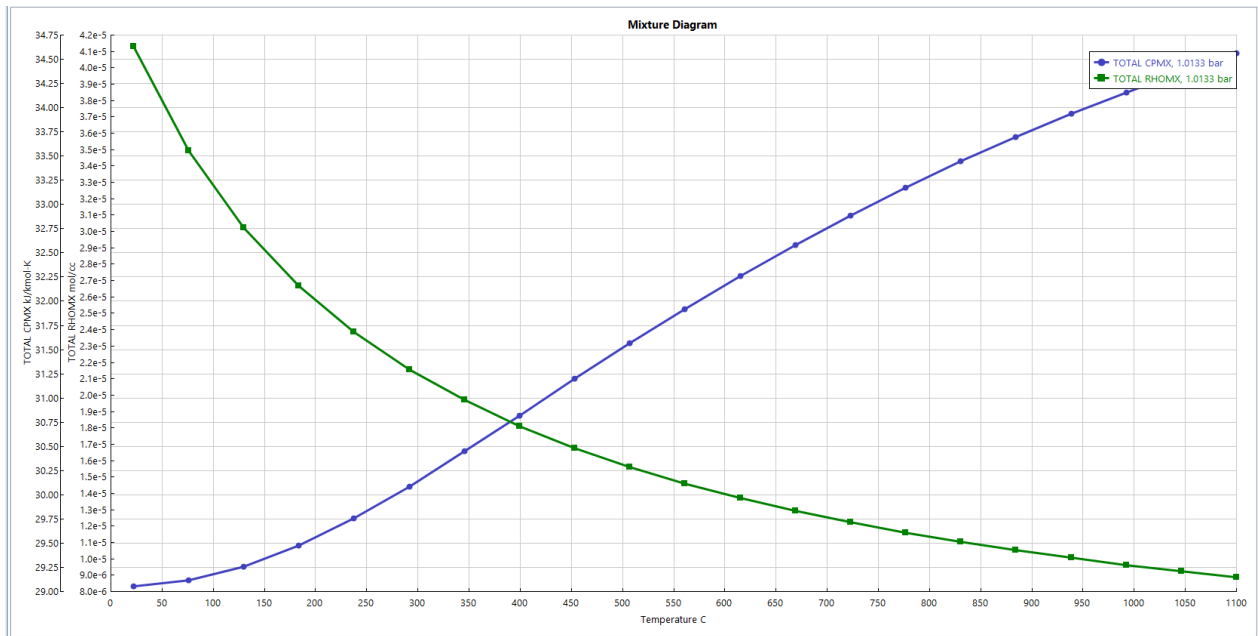


Figura 7. Grafica de la Densidad del aire ASPEN PLUS V.8.8

Una vez teniendo estos datos gráficos se ocuparon las herramientas de MATLAB para obtener la función polinómica, de grado 4, para así poder ocupar esta función con las temperaturas medidas en nuestro termopar estos datos se muestran en la Figura 8. Correlación densidad del aire.

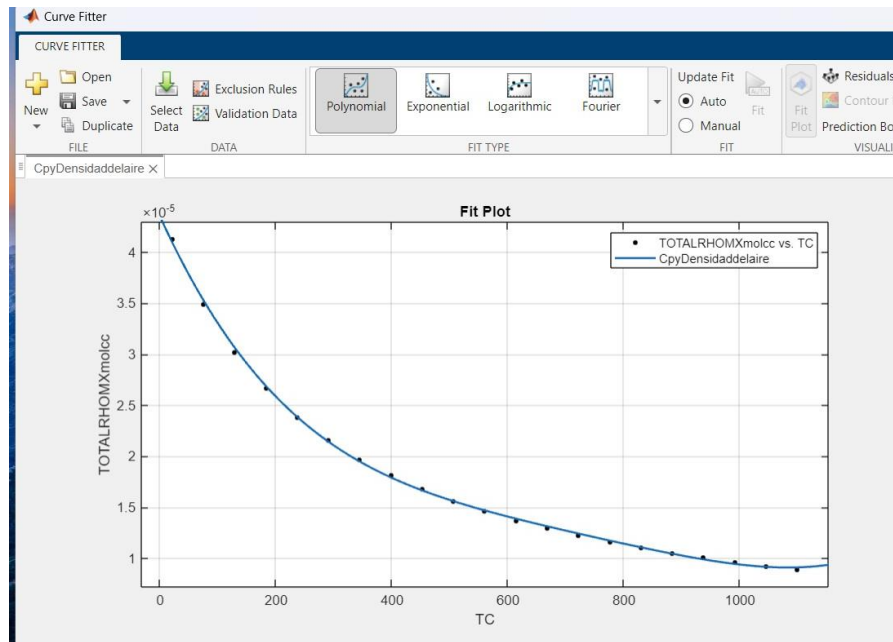


Figura 8. Correlación densidad del aire

Con estos parámetros podemos determinar una función con una fiabilidad del 99.95%, de acuerdo con la Ecuación 8

$$\rho = (6.49 * 10^{-17})(T)^4 + (-1.93 * 10^{-13})(T)^3 + (2.19 * 10^{-10})(T)^2 + (-1.25 * 10^{-7})(T) + 4.35 * 10^{-5} \text{ [mol/cm}^3\text{]}$$

Ecuación 8. Correlación Densidad del Aire

Una vez teniendo estos datos podemos regresar a la Ecuación 5. Balance de Energía Flux de Calor en donde podemos observar el Cp del aire sin embargo conocemos que el Cp del aire de igual forma es una función con respecto a la temperatura la cual fue calculada a partir de ASPEN PLUS V.8.8 la cual se muestra en la Figura 9. Grafica del Cp del aire ASPEN PLUS V.8.8.

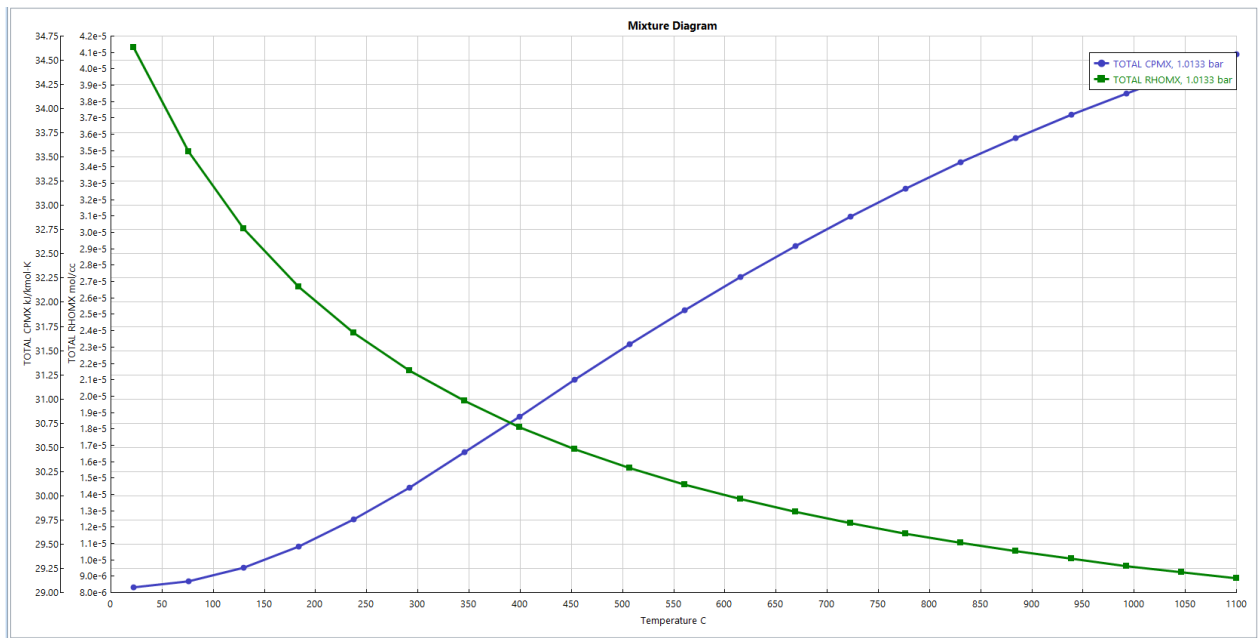


Figura 9. Grafica del Cp del aire ASPEN PLUS V.8.8

Con esto procedemos nuevamente a obtener la ecuación mediante las herramientas de MATLAB la cual se muestra en la siguiente imagen:

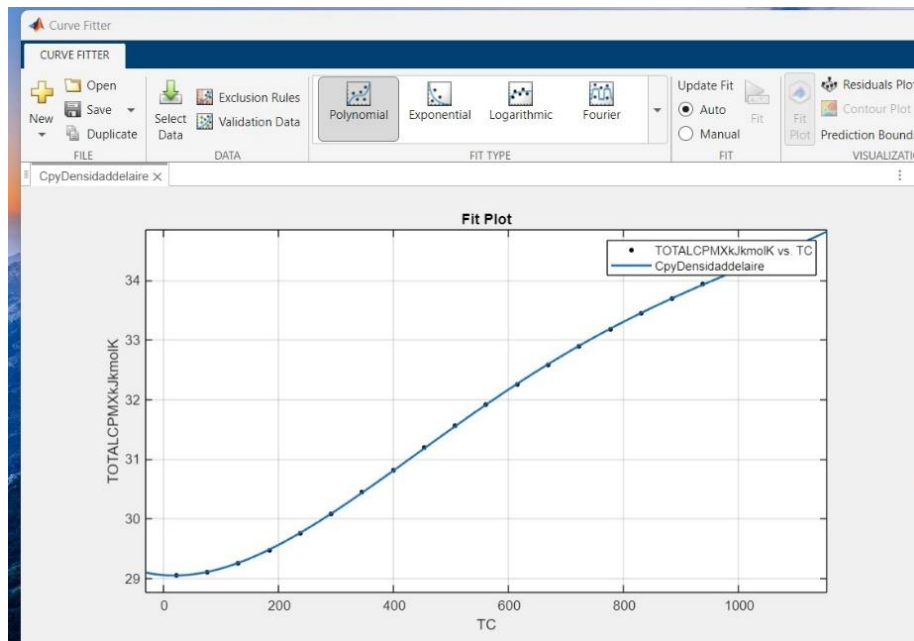


Figura 10. Correlación del Cp del aire

Ahora con estos datos obtenemos la Ecuación 9 la cual cuenta con una fiabilidad del 100%

$$C_p = (7.65 * 10^{-7})(T)^4 + (-2.22 * 10^{-8})(T)^3 + (2.04 * 10^{-5})(T)^2 + (-0.0007)(T) + 29.0549$$

[J/mol*K]

Ecuación 9. Correlación Cp del Aire

Y ahora tenemos todos los datos para poder ocupar la Ecuación 5. Balance de Energía Flux de Calor, para una vez obteniendo el Flux de calor poder pasar la ecuación principal la cual es la Ecuación 4. Eficiencia Térmica, sin embargo nuevamente obtenemos que el ΔH_0 es una función de igual forma dependiente del tiempo por lo que se realiza los mismos pasos que se realizaron anteriormente ocupando el software ASPEN V.8.8 y MATLAB para obtener la función de correlación de ΔH_0 como se ve en la Ecuación 11

$$\Delta H_0 = (3 * 10^{-3})(T)^2 + (-10.8022)(T) - 2.42 * 10^5 \text{ [J/mol]}$$

Ecuación 10. Correlación del ΔH_0

Y con esta función de correlación podemos obtener mediante la Ecuación 4. Eficiencia Térmica de nuestro quemador siendo esta una función con respecto al tiempo.

3.2.1.5 Sostenimiento de Temperatura

Otro de nuestros parámetros mostrados en la Tabla 3. Es el sostenimiento de la temperatura la cual está indicada por la Ecuación 11.

$$T = f(t)$$

Ecuación 11. Sostenimiento de la Temperatura

Esta claramente es una función dependiente del tiempo y para poder ocuparla, se realizará un cálculo de error con respecto a la temperatura promedio en estado estacionario de cada termopar. Esto contemplando que cada termopar llega a este estado estacionario

A continuación, se muestra el cálculo para el caso del termopar numero 1:

1. Primero que se hace es determinar el promedio de la temperatura en estado estacionario la cual para el caso del termopar numero 1 es de 425.6256831°C
2. Se calcula el porcentaje de error el cual está dado por la Ecuación 12.

$$\%Error = \frac{\|\bar{X} - T_{medida}\|}{\bar{X}} * 100$$

Ecuación 12. Porcentaje de Error en el Sostenimiento de la Temperatura

Donde

\bar{X} = Promedio de la temperatura en estado estacionario

T_{medida} = Temperatura medida por el Termopar

Esta secuencia de cálculo se presenta en la Figura 11.

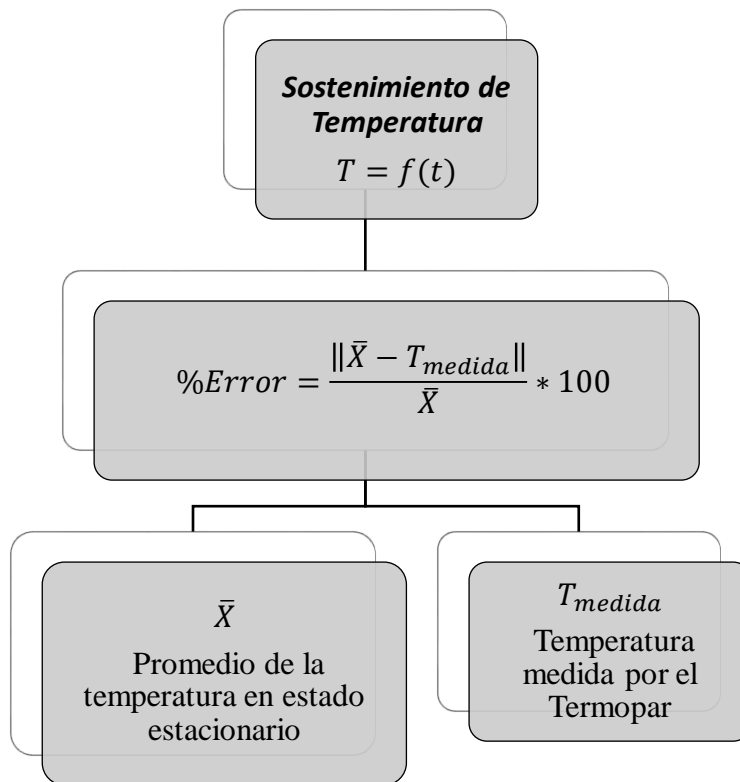


Figura 11. Secuencia de cálculo Sostenimiento de Temperatura.

Estos datos son graficados y mostrados en nuestra interfaz mediante un bloque Scope.

Con todos estos datos ahora se puede continuar con los pasos:

- Conexión de bloques: Se interconectan los bloques de Simulink para crear el flujo de datos deseado desde la adquisición hasta la visualización, utilizando conexiones personalizadas y comentarios descriptivos.
- Simulación y pruebas: Se ejecuta la simulación de Simulink y se verifica el correcto funcionamiento de la interfaz en diferentes escenarios de temperatura. Se evalúa la precisión de la visualización de datos, la sincronización entre los termopares y la legibilidad de la información en tiempo real.

Mejoras y personalización:

- Visualización interactiva avanzada: Se implementan controles de escala y rango automáticos para ajustar la visualización de datos en función de las temperaturas medidas. Se incorporan indicadores de estado para cada termopar, mostrando si la temperatura se encuentra dentro del rango normal o si se ha producido una anomalía.
- Alertas y notificaciones personalizables: Se configuran alarmas visuales para alertar al usuario sobre condiciones de temperatura anormales o fuera de rango en cualquiera de los termopares. Se permite personalizar el nivel de severidad de las alarmas y el tipo de notificación. Las alarmas ocupadas son sensores led de diferentes colores como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Colores y Rango de Led

Color	Rango en °C
Verde	-200 a 900
Naranja	901-1100
Rojo	1100 en adelante

Capítulo 4 RESULTADOS

4 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de cada uno de los apartados de la metodología como lo son las mediciones de hidrógeno, así como la creación de la interfaz para la visualización de datos en tiempo real.

4.1 Instrumentación

Primeramente, se buscaron cada una de las instrumentaciones actuales contemplando cada uno de los parámetros mencionados en la metodología 1 dando como resultado la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación de tecnologías.

Tecnología	Rango de Temperatura	Precisión	Resolución	Frecuencia de Muestreo	Ventajas	Desventajas
Termopar	-200 a 2,500 °C	± 1 °C	0.1 °C	1 Hz (1 vez/segundo)	Amplio rango de temperatura, durabilidad, costo efectivo, rápida respuesta	Sensible a interferencias electromagnéticas, requiere contacto directo
Pirómetro Óptico	700 a 3,000 °C	± 0.5 %	1 °C	1 Hz (1 vez/segundo)	Sin contacto directo, alta precisión a altas temperaturas	Costoso, afectado por polvo y humo en la línea de visión
Sensor Infrarrojo	-50 a 3,000 °C	± 1-2 %	0.1 °C	10 Hz (10 veces/segundo)	Sin contacto directo, rápida respuesta	Afectado por emisiones de fondo y objetos intermedios
Cámara Termo gráfica	-40 a 2,000 °C	± 2-5 °C	0.1 °C	30 Hz (30 veces/segundo)	Mide distribución de temperatura en un área amplia	Muy costoso, afectado por condiciones ambientales (polvo, humo)

De igual forma se presenta la Tabla 11 con una comparación de los precios de cada uno de estas tecnologías.

Tabla 11. Comparación de precios en diferentes tecnologías

Tecnología		Costo Inicial	Costo de Mantenimiento	Costo Total
Termopar		Bajo (\$50 - \$200)	Bajo	Bajo
Pirómetro	Óptico	Alto (\$1,000 - \$5,000)	Medio	Alto
Sensor Infrarrojo		Medio (\$200 - \$1,000)	Bajo a Medio	Medio
Cámara gráfica	Termo	Muy Alto (\$5,000-\$20,000)	Alto	Muy Alto

Con esto podemos observar que los termopares son la mejor opción pues como se mostró en la Tabla 7. Requisitos de medición. Los termopares son los que cumplen mayormente con cada uno de los criterios propuestos pues tienen un rango de temperaturas dentro del necesario así como una precisión, resolución y frecuencia de muestreo dentro del rango de trabajo, así como un fácil acceso a este por su bajo costo de adquisición.

Sin embargo, conocemos que existen diferentes tipos de termopares los cuales se clasifican por un tipo de letra y estos tienen diferentes rangos de lectura así como precisiones distintas como un resumen de la investigación hecha se presenta la Tabla 12.

Tabla 12. Termopares más comunes

Tipo de Termopar	Materiales	Rango de Temperatura (°C)	de Precisión
Tipo K	Cromel-Alumel	-200 a 1,260	± 1.5 °C o 0.4 %
Tipo J	Hierro-Constantán	-210 a 760	± 2.2 °C o 0.75 %
Tipo T	Cobre-Constantán	-200 a 400	± 1 °C o 0.75 %
Tipo E	Cromel-Constantán	-200 a 900	± 1.7 °C o 0.5 %

Conociendo cada uno de estos termopares más comunes podemos definir que el termopar Tipo K es el que mejor se ajusta dentro de los rangos operativos de nuestro equipo, así como su precisión y frecuencia es la deseada por nosotros.

4.2 Programación en Arduino

Para la programación dentro de Arduino es esencial el uso del módulo MAX6675 el actúa como un conversor de termopar a digital, permitiendo al Arduino leer la temperatura detectada por el termopar y procesarla para su posterior análisis y visualización.

La programación se llevó a cabo en el entorno de desarrollo integrado de Arduino (IDE), utilizando el lenguaje de programación basado en C/C++. En primer lugar, fue necesario incluir la librería adecuada para el módulo MAX6675, lo que facilitó la comunicación entre el Arduino y el módulo y simplificó la lectura de datos de temperatura.

Una vez configurada la comunicación con el módulo MAX6675, se escribió el código para leer la temperatura del termopar y enviarla al Arduino para su procesamiento. Esto implicó la utilización de funciones específicas proporcionadas por la librería del MAX6675 para leer los datos de temperatura en forma de señales digitales y convertirlas en valores numéricos representativos de la temperatura en grados Celsius.

Además, se implementaron técnicas de programación para mejorar la precisión y estabilidad de las mediciones de temperatura, como la calibración de los sensores y la gestión adecuada de errores y excepciones. Esto garantizó la fiabilidad de los datos obtenidos y permitió una interpretación precisa de los resultados experimentales.

4.3 Validación de la programación

Para poder validar que las temperaturas leídas del termopar eran las correctas fueron comparadas con un termómetro de mercurio el cual junto con el termopar fueron sumergidos dentro de un vaso de precipitado la cual fue calentado en una parrilla de calentamiento 500mL de agua como se ve en la Figura 12, para observar las temperaturas de estos dos las lecturas del termopar fueron registradas cada segundo en una hoja de Excel mientras que en cuanto al termómetro de mercurio este fue grabado para poder obtener las lecturas igualmente cada segundo, el termómetro de mercurio contenía un rango de los 0 a 100°C con escalas de 1°C, los datos de ese experimento se muestran en Figura 13. Comparación Termopar vs Termómetro.



Figura 12. Foto de la prueba de termómetro mercurio vs termopar

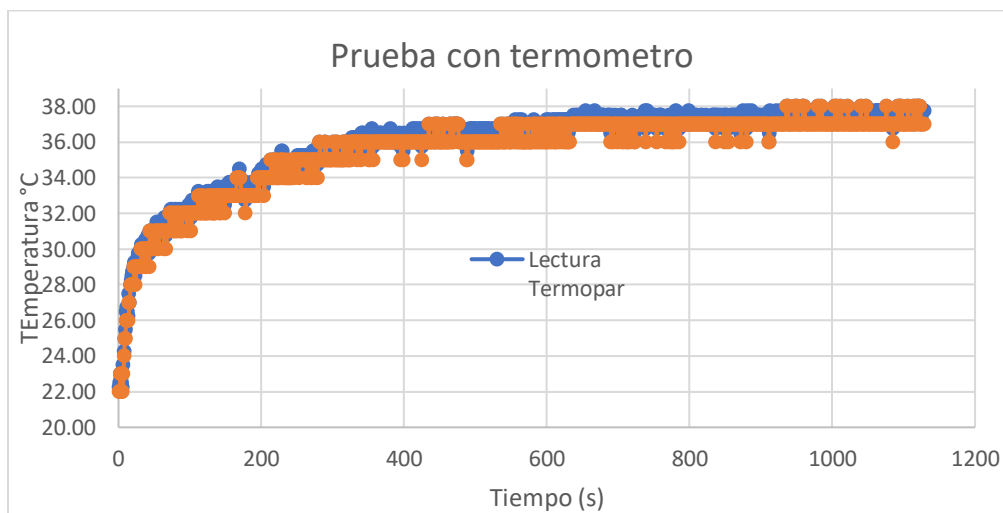


Figura 13. Comparación Termopar vs Termómetro

Haciendo la comparación de las lecturas entre el termopar y el termómetro podemos notar que las variaciones son mínimas pudiendo así decir que la temperatura registrada con la programación realizada es más que fiable para su uso.

Continuando con las pruebas preliminares realizamos un análisis térmico de un mechero de alcohol para así obtener datos preliminares para identificar que las temperaturas medidas eran correctas con el uso de 5 termopares como se muestra en la Figura 14 estos termopares fueron distribuidos de acuerdo a la morfología de la flama siendo que esta tenia picos máximos de 25 cm y una anchura máxima de 2 cm.

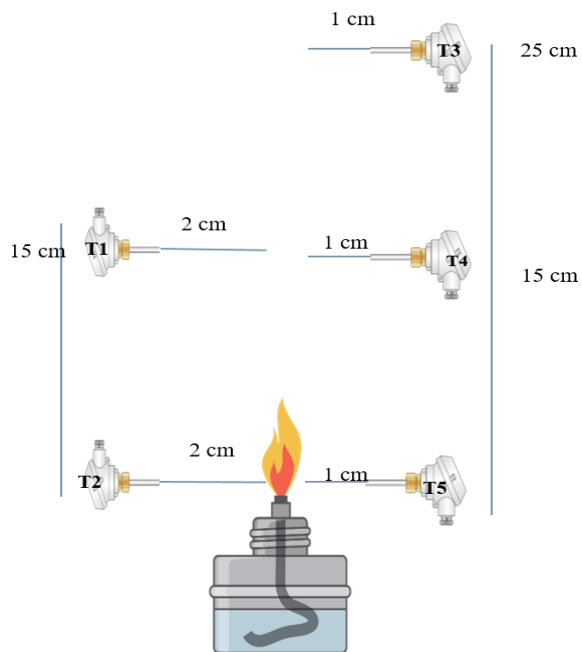


Figura 14. Diagrama de mechero de etanol.

Los resultados medidos se muestran en la Figura 15 para observar su comportamiento y así tomar como base para la disposición de termopares en el quemador de hidrógeno y también tener datos reales dentro de este.

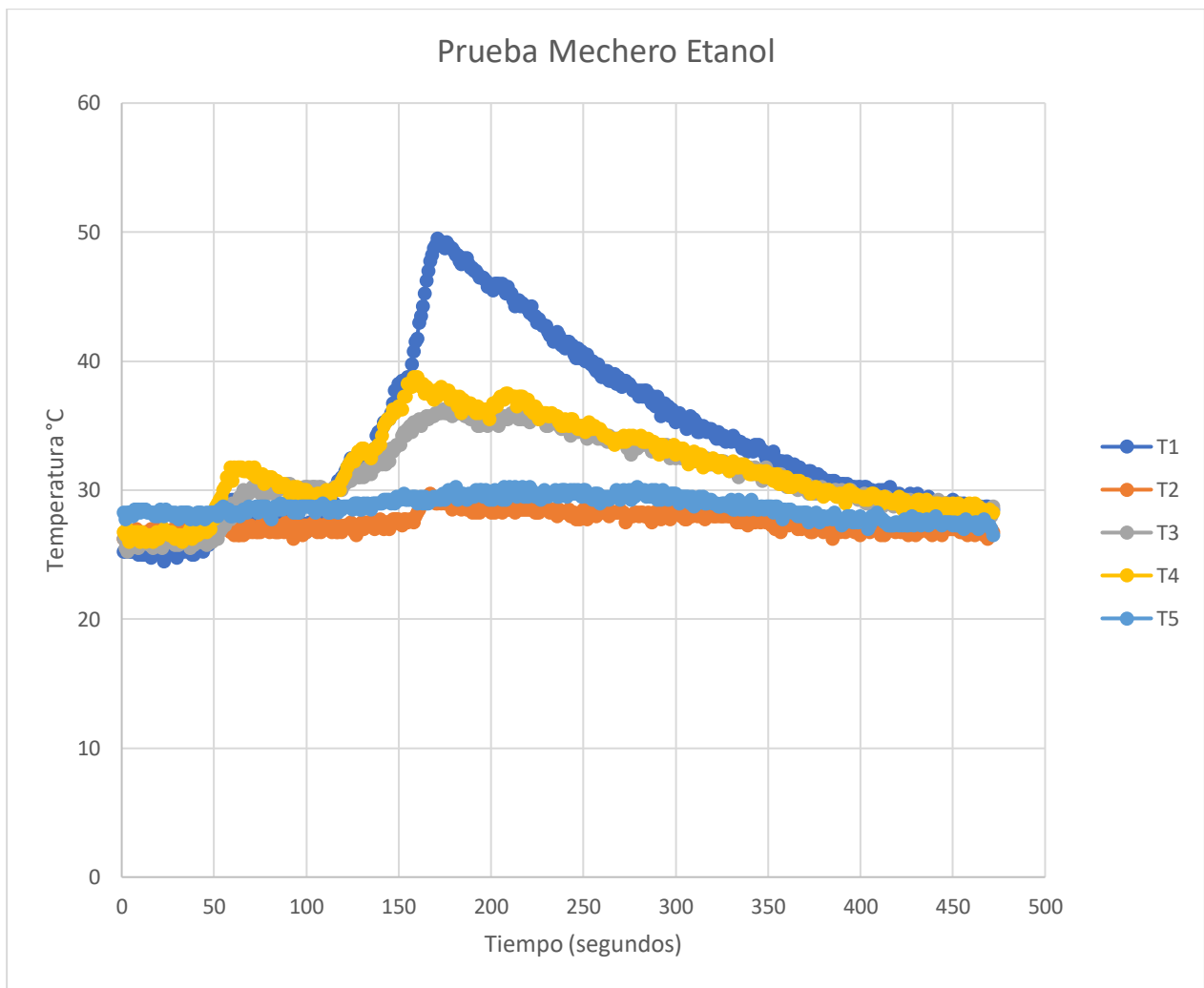


Figura 15. Lecturas de temperaturas en mechero de alcohol

Con los resultados obtenidos dentro del mechero de etanol pudimos notar que existe una transferencia de calor en cada una de las zonas que fueron colocados los termopares por lo que esta disposición fue la misma propuesta para poder ocuparse dentro del quemador de hidrogeno únicamente ajustando la altura de estos pues la flama del quemador tiene un tamaño menor asi como agregando un termopar más para pasar de 5 a 6 termopares utilizados para así tener una mayor y mejor perfil de la distribución de la temperatura y con esto se realizaron unas mediciones preliminares en el quemador con la siguiente disposición mostrada en la Figura 16.

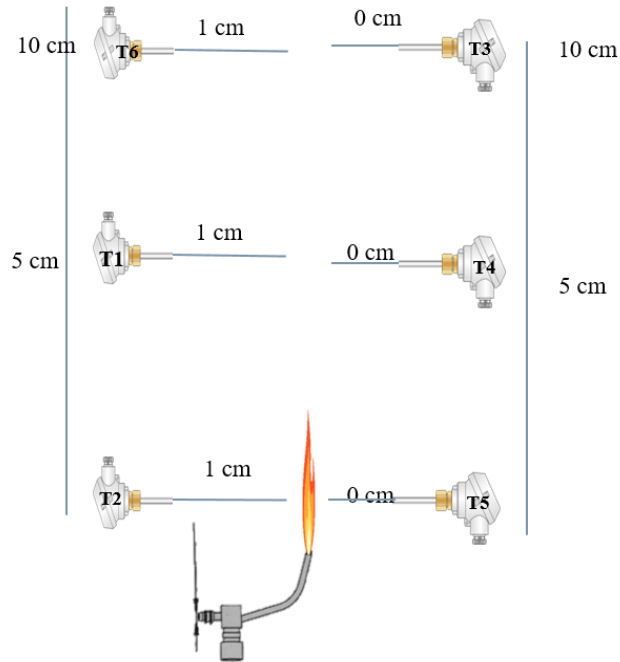


Figura 16. Diagrama de disposición de termopares en el quemador.

Con esta disposición de los termopares dentro del quemador de hidrogeno se obtuvieron los siguientes resultados:

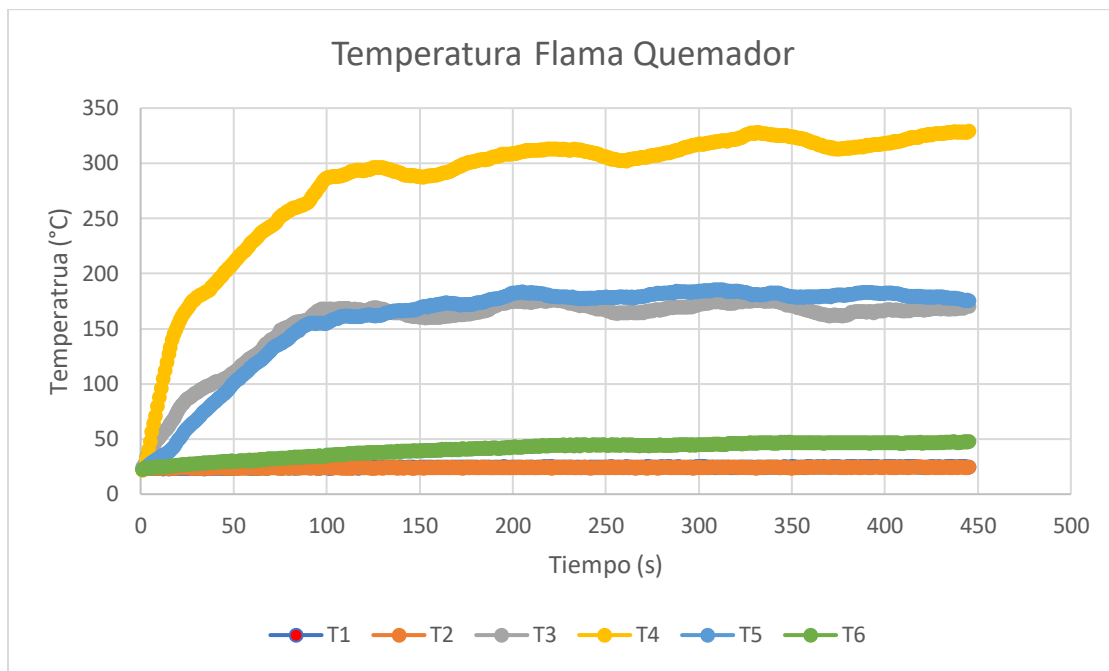


Figura 17. Temperaturas del quemador preliminares

Como podemos observar con estos datos preliminares la posición radial de los termopares nos muestra que la variación de la temperatura es mínima por lo cual podemos decir que al ser tan mínima la variación de la temperatura, la transferencia de calor de forma radial a la flama es considerada nula por lo que se plantea una nueva disposición de los termopares para tener una mejor medición la cual se muestra en la Figura 18.

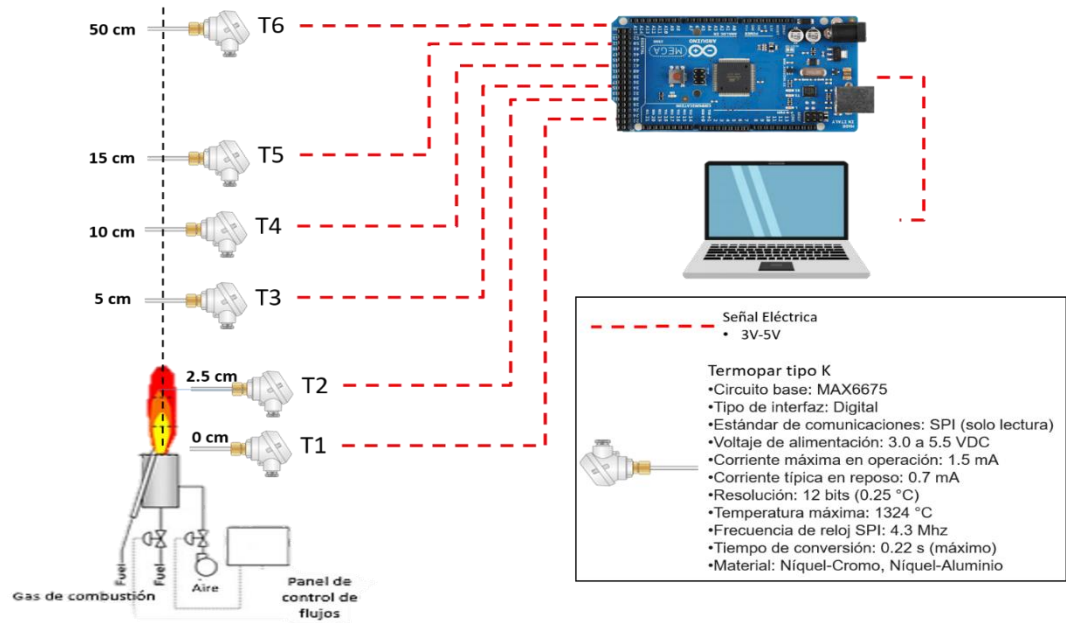


Figura 18. Diagrama final de posición de Termopares

4.4 Lecturas del quemador de Hidrógeno

Se realizaron varias pruebas en el quemador de hidrógeno para obtener los resultados a diferentes horas en el uso del quemador con la finalidad de obtener mejores y más amplios resultados para tenerlos como comparación. En la Figura 19. Lecturas de Temperatura en el Quemador de Hidrógeno se muestra las temperaturas de cada termopar en grados Celsius, así como el paso del tiempo en segundos midiendo un total de 381 segundos.

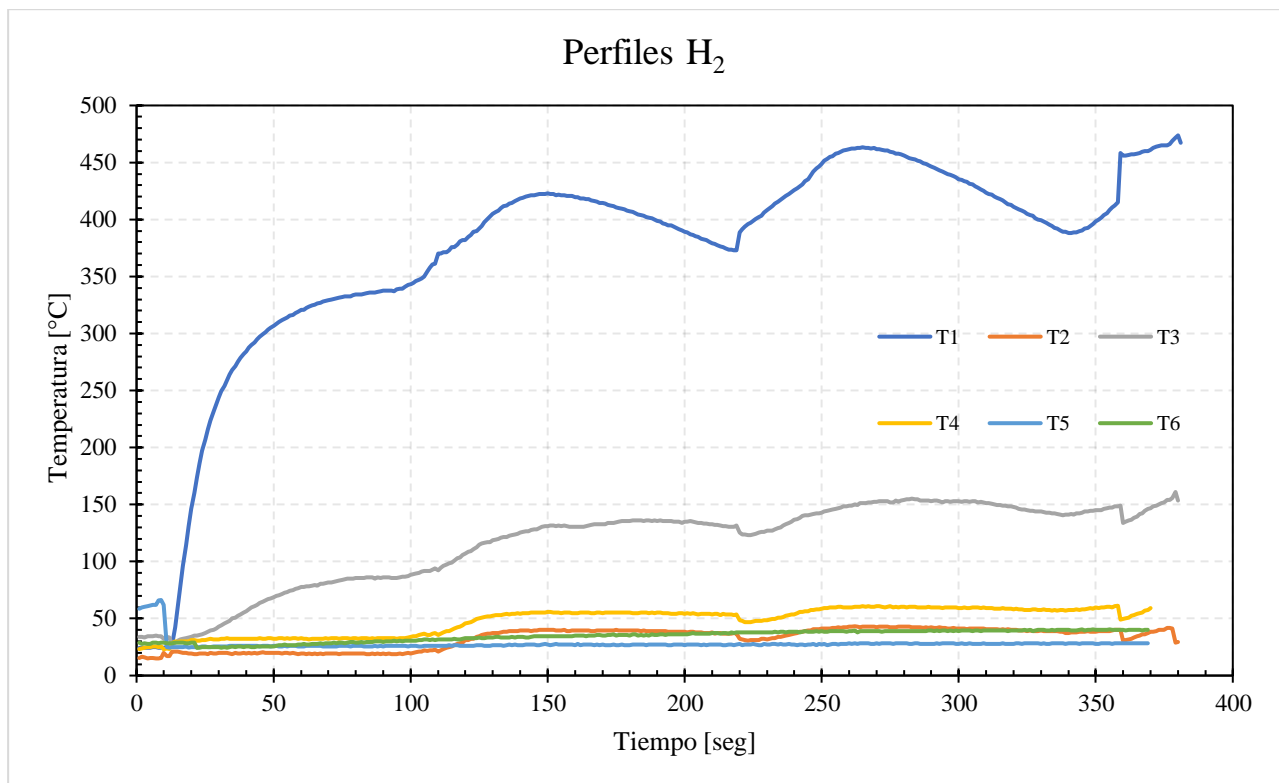


Figura 19. Lecturas de Temperatura en el Quemador de Hidrógeno

Y de igual forma en la Figura 20, Figura 22, Figura 24, Figura 26, Figura 28, se muestra la gráfica de cada uno de los termopares comparados con el promedio en estado estacionario tomando desde el segundo 250 hasta finalizar nuestra prueba como base para su medición, así mismo en la Figura 21, Figura 23, Figura 25, Figura 27, Figura 29 se muestra un análisis estadístico para cada termopar mostrando valores como su media, moda, mediana, etc. con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos posibles en la medición de las temperaturas. Obteniendo como resultado a partir de sus desviaciones estándar y sus varianzas que todos los termopares cuentan con un grado de exactitud muy bueno pues sus varianzas son mínimas entre sí los que nos lleva a concluir que los resultados obtenidos para cada termopar son los suficientemente fiables para su uso.

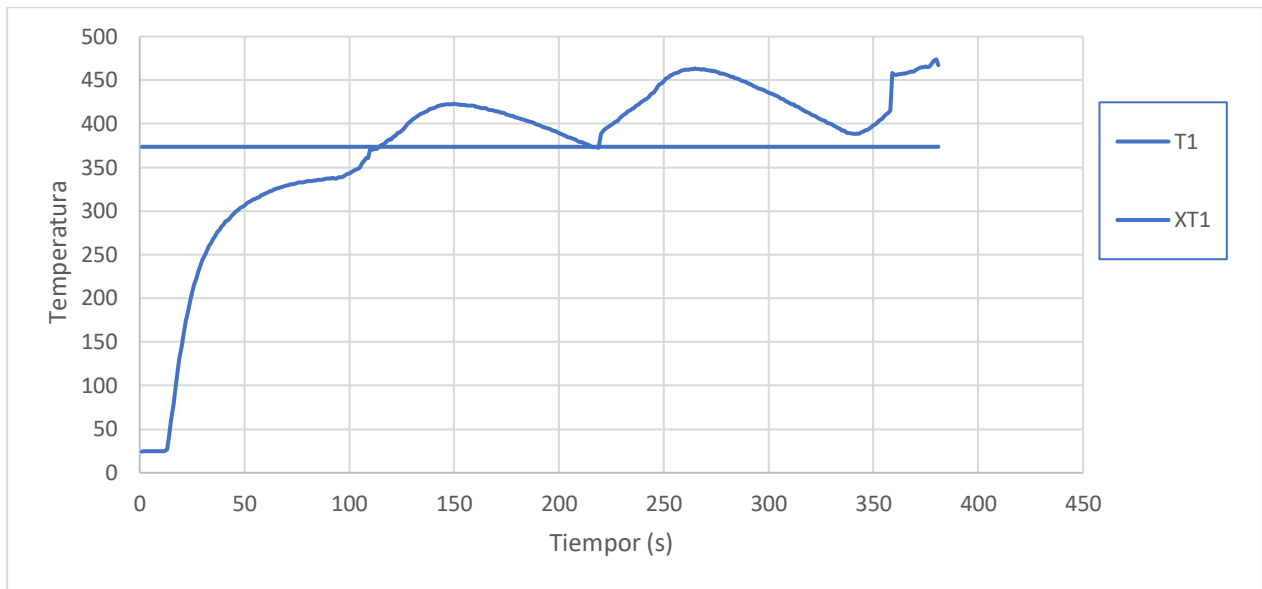


Figura 20. Lecturas de Temperatura del Termopar 1 en el Quemador de Hidrógeno

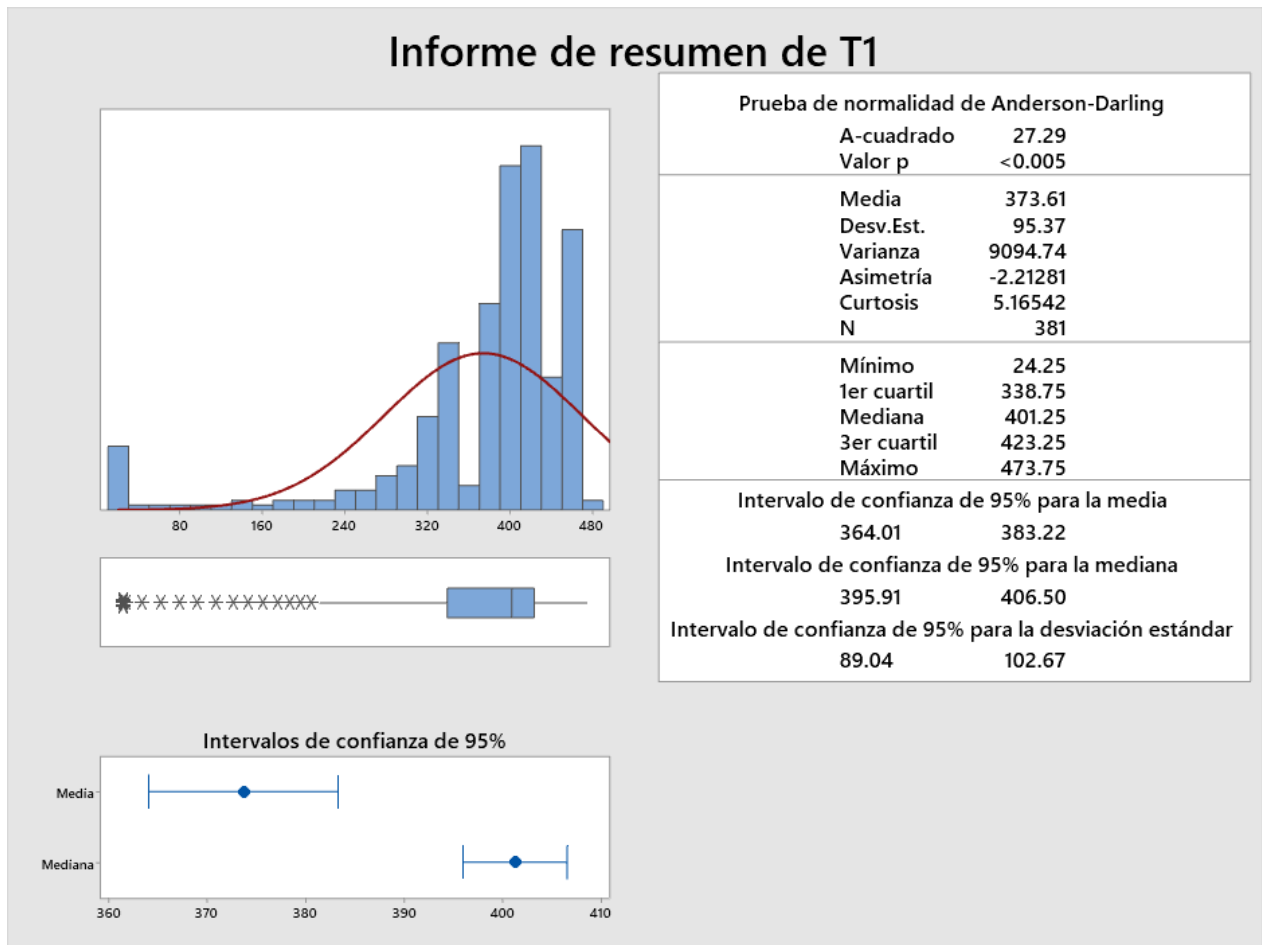


Figura 21. Análisis estadístico del Termopar 1

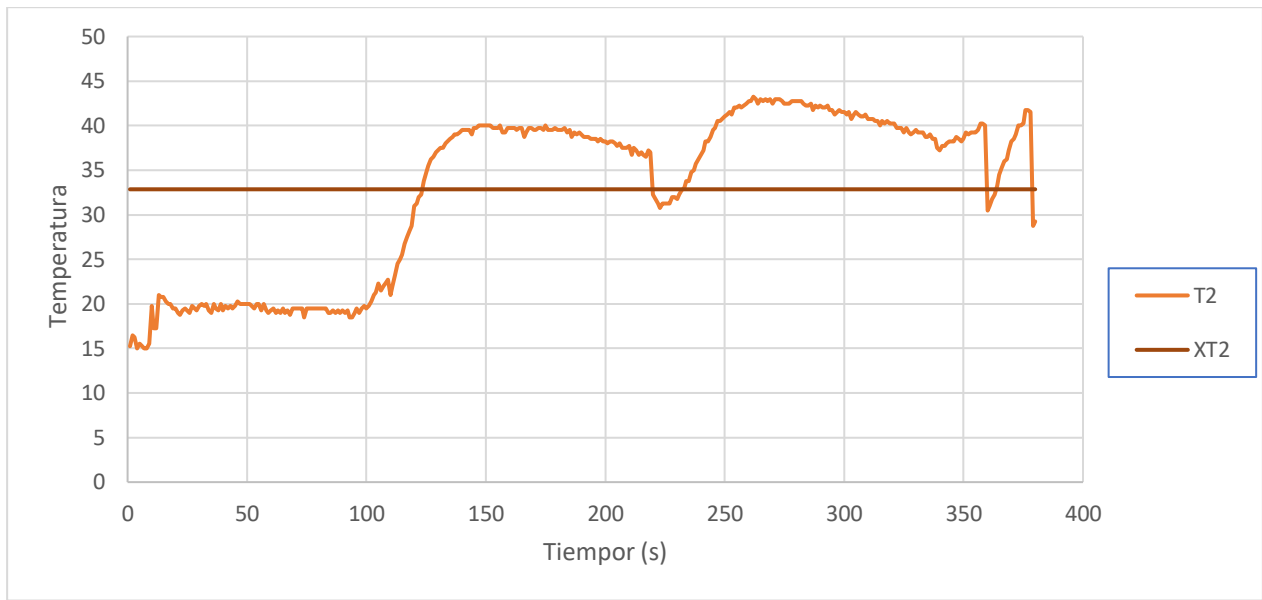


Figura 22. Lecturas de Temperatura del Termopar 2 en el Quemador de Hidrógeno

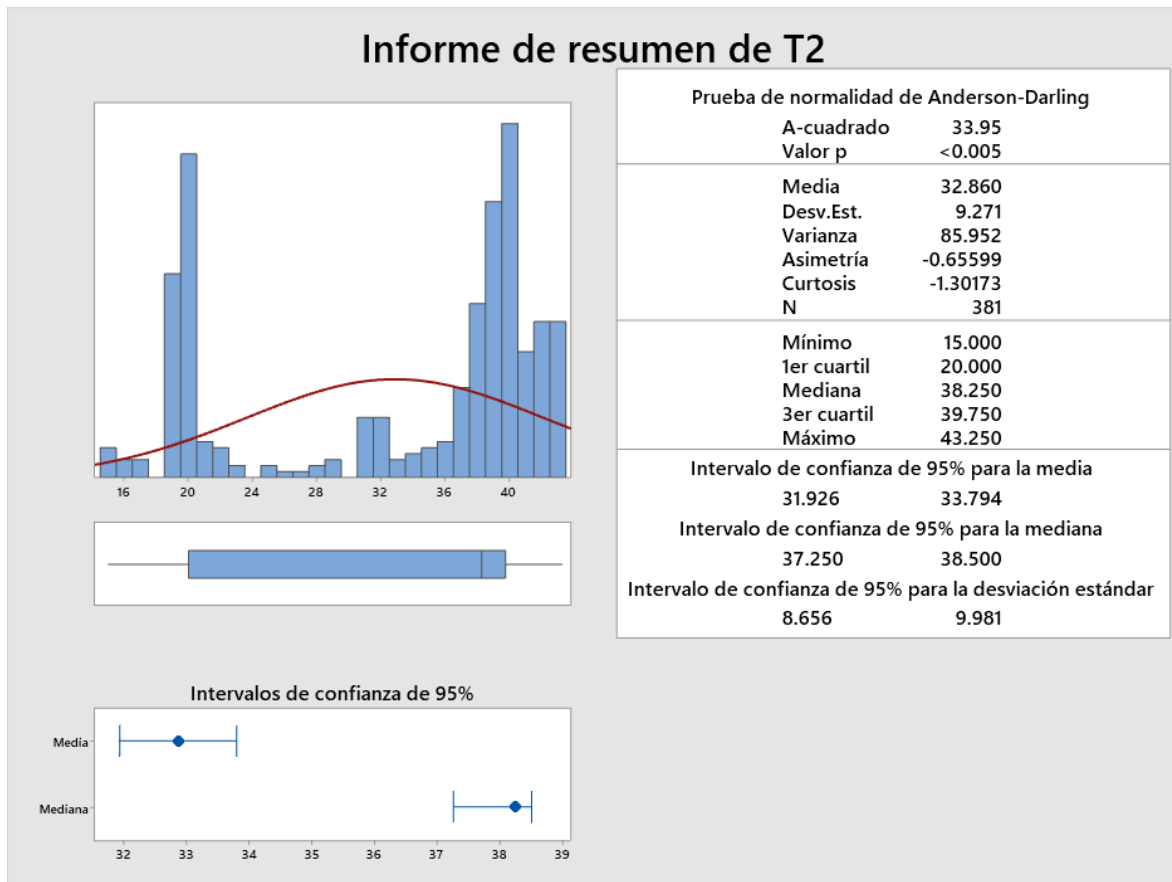


Figura 23. Análisis estadístico del Termopar 2

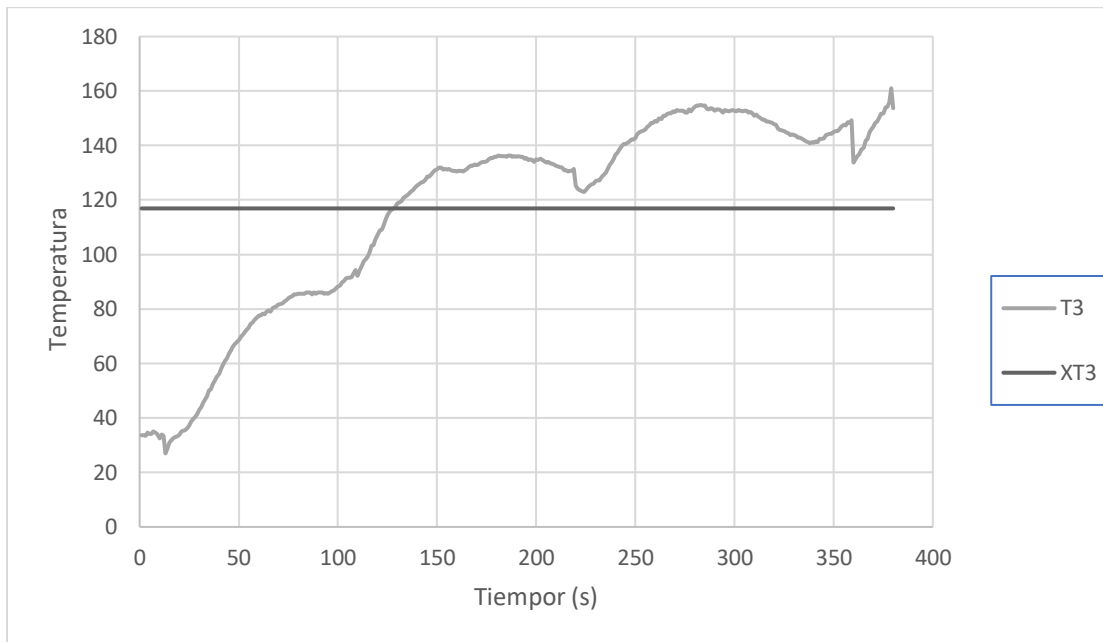


Figura 24. Lecturas de Temperatura del Termopar 3 en el Quemador de Hidrógeno

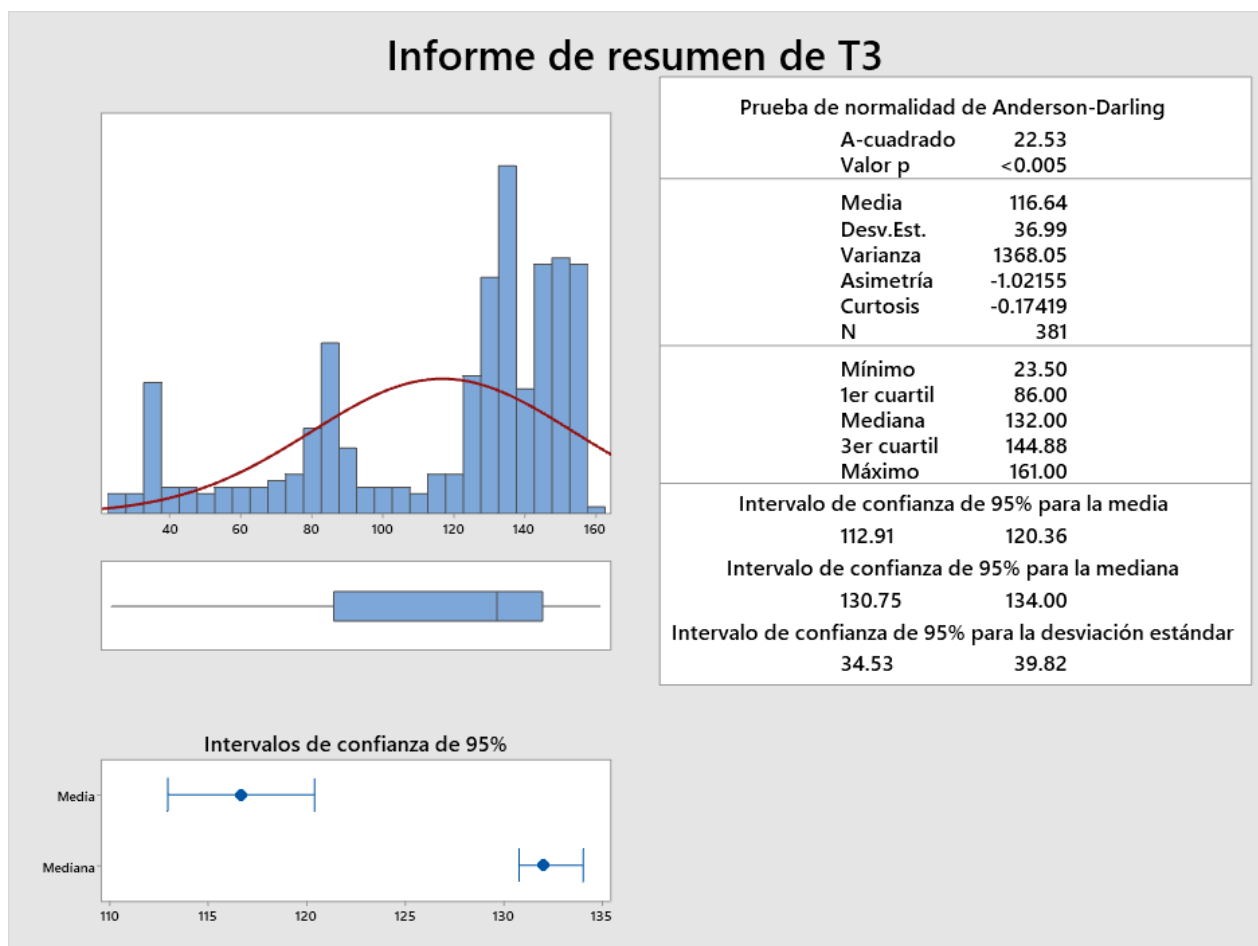


Figura 25. Análisis estadístico del Termopar 3

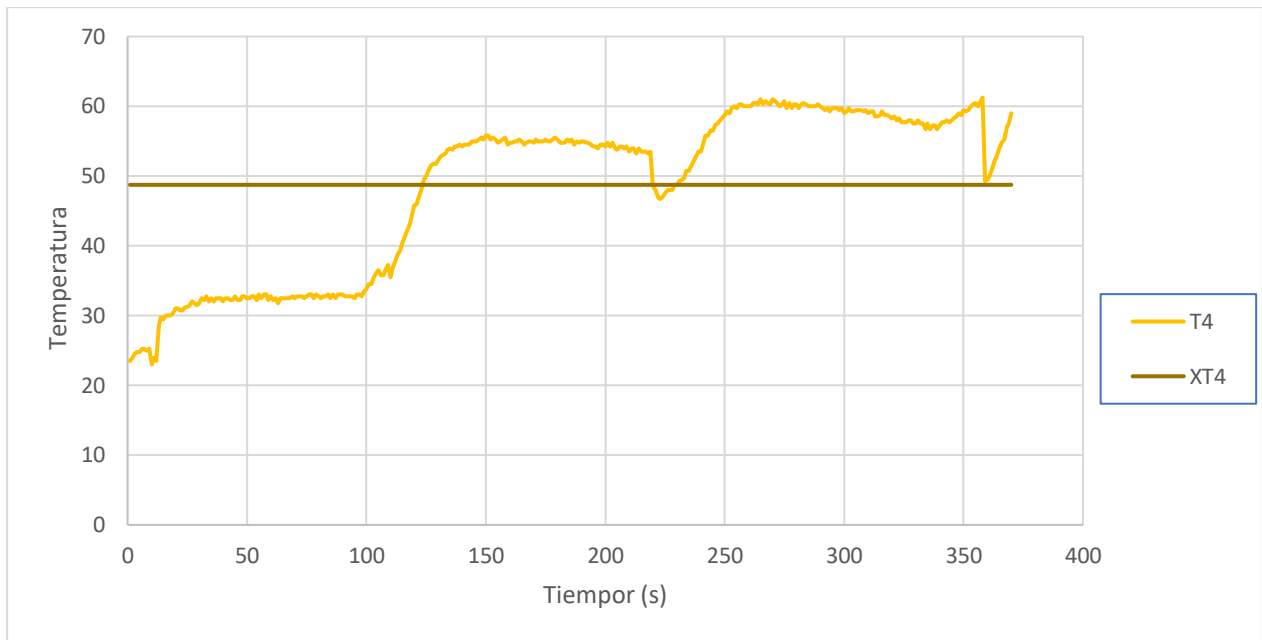


Figura 26. Lecturas de Temperatura del Termopar 4 en el Quemador de Hidrógeno

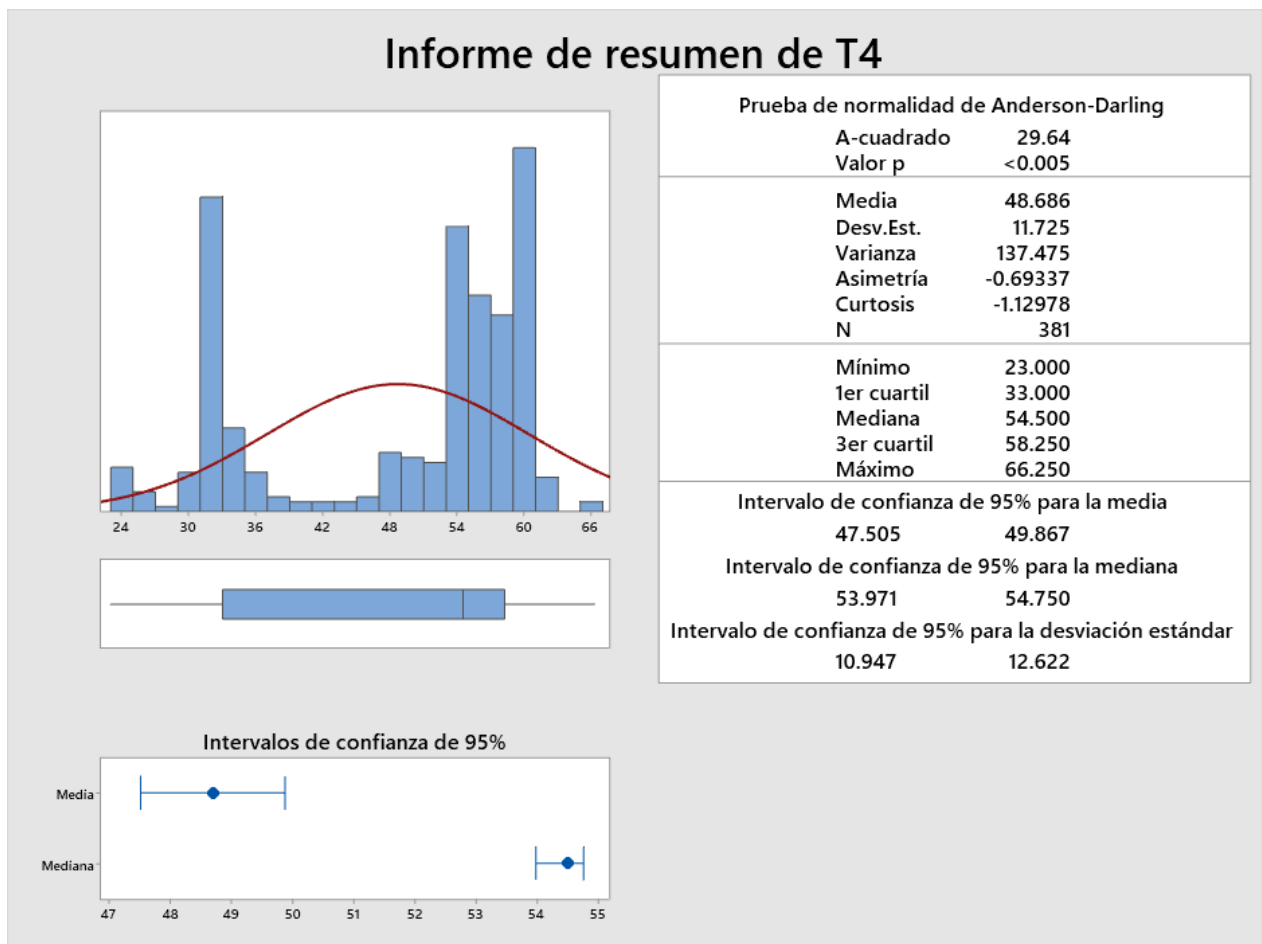


Figura 27. Análisis estadístico del Termopar 4

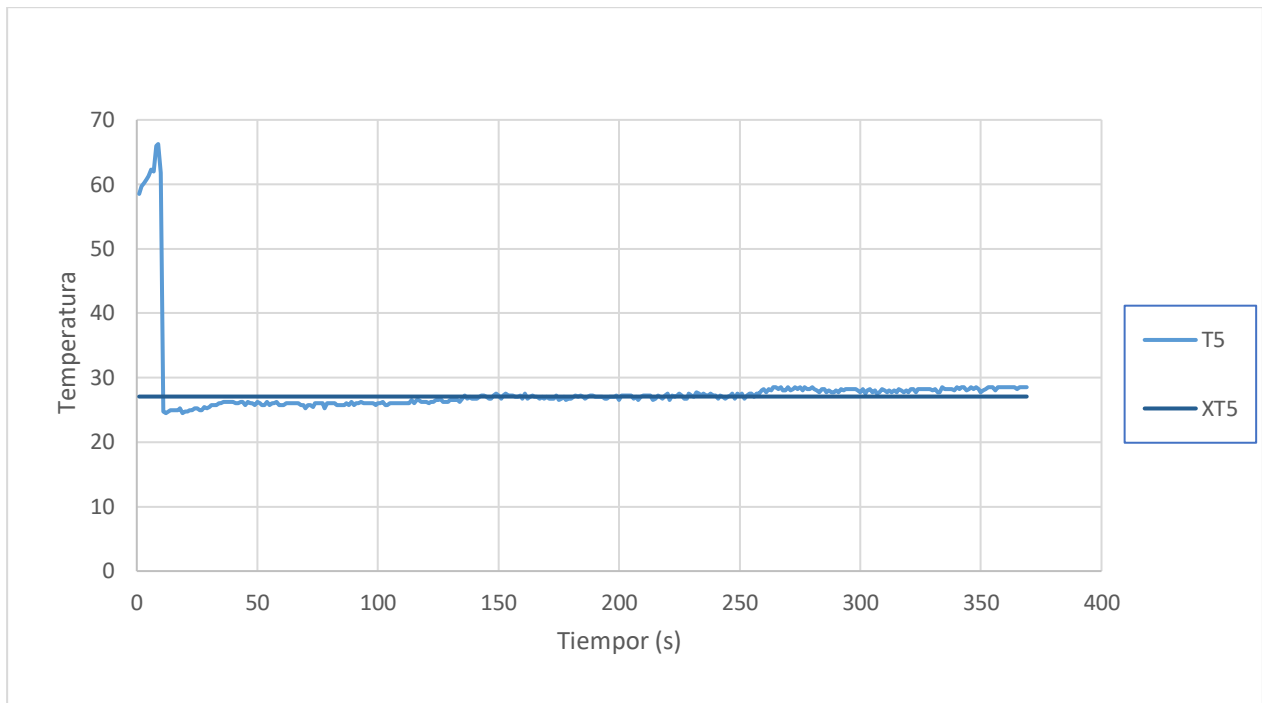


Figura 28. Lecturas de Temperatura del Termopar 5 en el Quemador de Hidrógeno

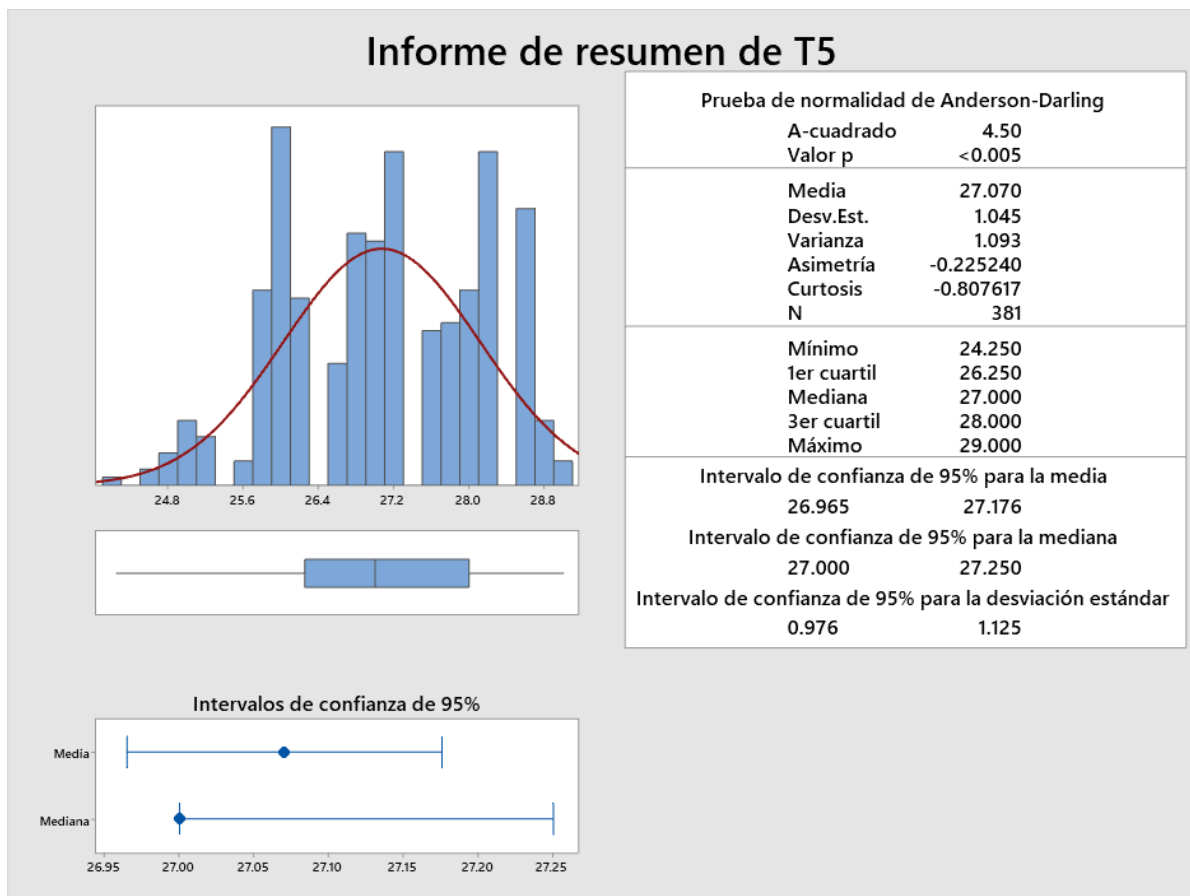


Figura 29. Análisis estadístico del Termopar 5

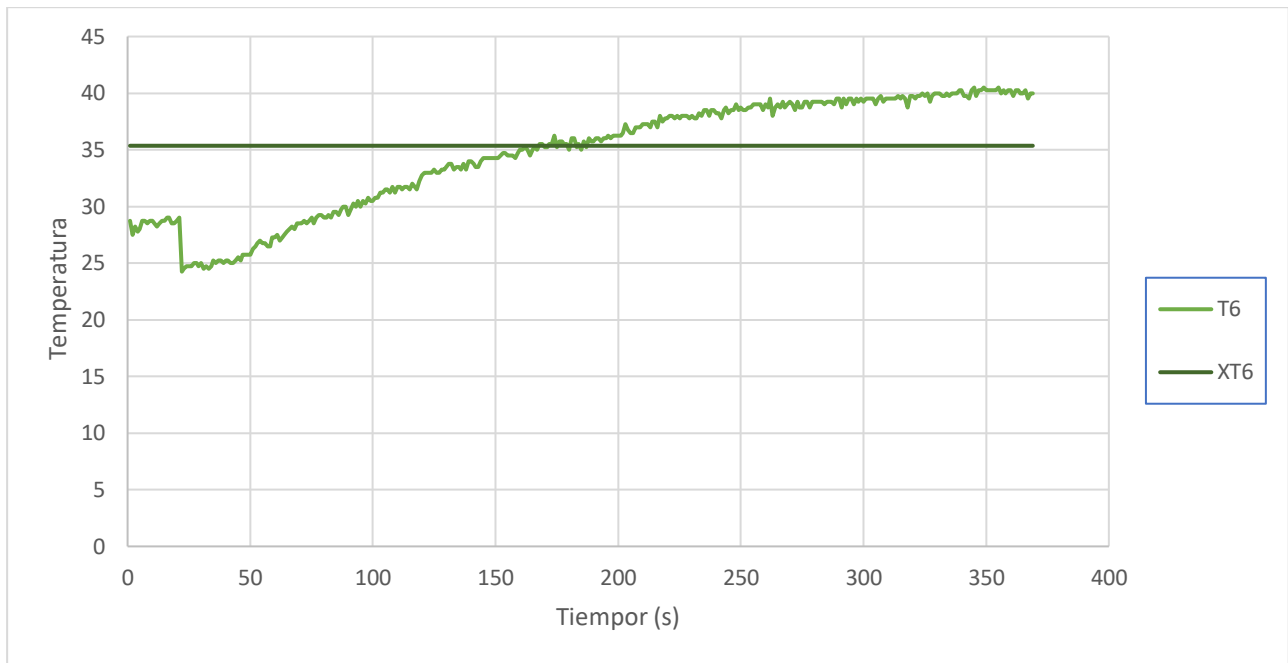


Figura 30. Lecturas de Temperatura del Termopar 6 en el Quemador de Hidrógeno

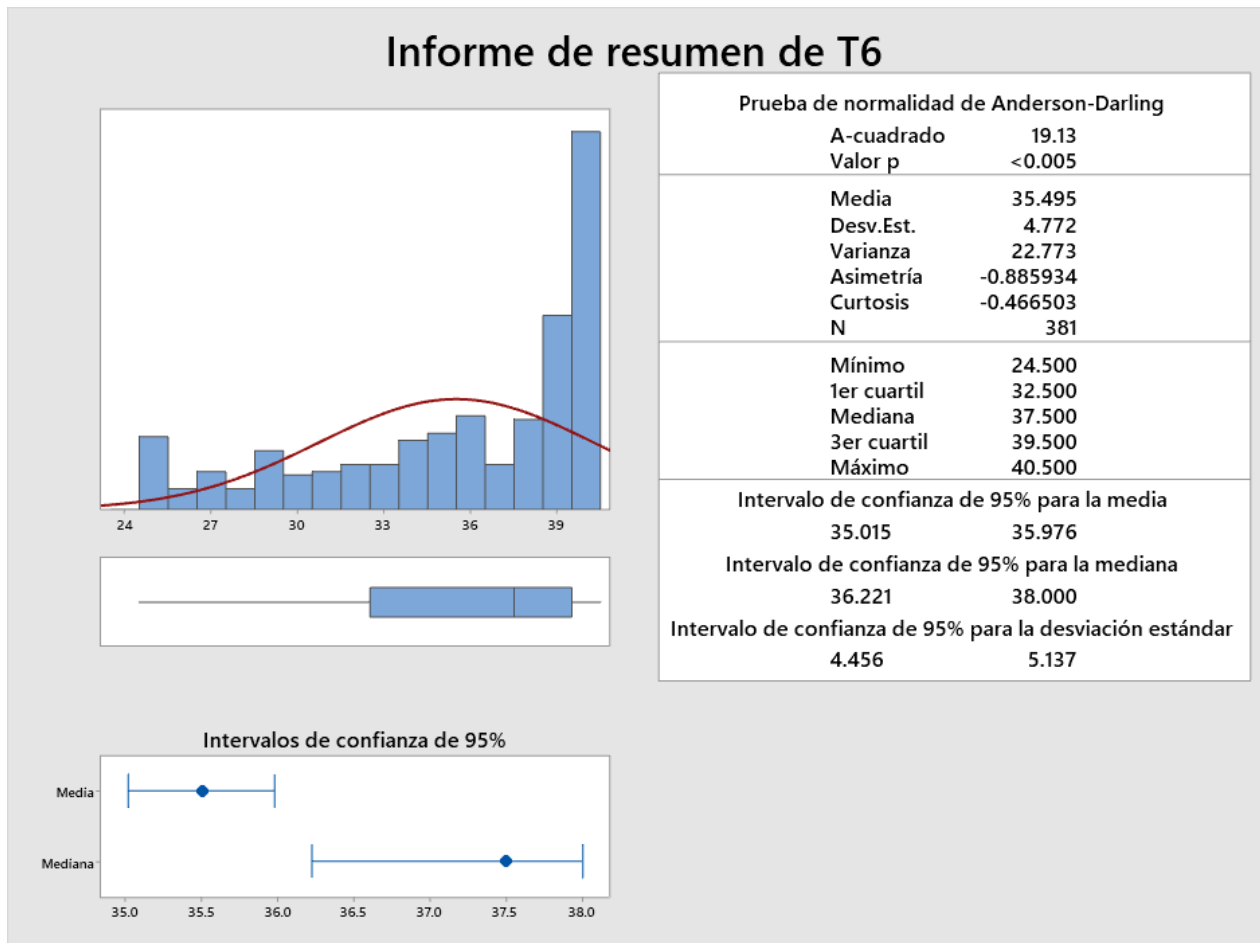


Figura 31. Análisis estadístico del Termopar 6

4.5 Estimación de la eficiencia de un quemador de hidrógeno a partir de las temperaturas

Procedimiento:

Recopilación de datos: Se recopilaron datos de temperatura de seis termopares ubicados en diferentes puntos del quemador de hidrógeno. Los datos se registraron en tiempo real con una frecuencia de muestreo de 1 segundo.

Cálculo de la temperatura promedio: Al tener los promedios de cada termopar se puede hacer el promedio global.

Cálculo de la temperatura teórica: Fue necesario también realizar el cálculo de la temperatura Teórica. Para ello, se utilizará la siguiente ecuación:

$$T_{Teórica} = \frac{\Delta H}{M_{agua}} + T_{referencia}$$

Ecuación 13. Cálculo de Temperatura Teórica

Donde:

- ΔH : Entalpía de combustión del hidrógeno (en kJ/mol)
- M_{agua} : Masa molar del agua (en g/mol)
- $T_{referencia}$: Temperatura de referencia (en °C)

Valores para el hidrógeno:

- ΔH : -285.8 kJ/mol
- M_{agua} : 18 g/mol

La temperatura de referencia es de 25 °C (298 K), la temperatura teórica de combustión completa del hidrógeno sería:

$$T_{teórica} = (-285.8 \text{ kJ/mol} / 18 \text{ g/mol}) + 25 \text{ °C} = 2822.2 \text{ °C}$$

Estimación de la eficiencia: La diferencia entre la temperatura promedio de los gases de combustión y la temperatura teórica de combustión completa proporciona una indicación de las pérdidas de energía durante el proceso de combustión de hidrógeno. Cuanto mayor sea la diferencia, menor será la eficiencia del quemador.

La eficiencia estimada del quemador de hidrógeno se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia (\%)} = 100 * \frac{(\text{Temperatura promedio de los humos} - \text{Temperatura teórica de combustión completa})}{\text{Temperatura teórica de combustión completa}}$$

Ecuación 14. Eficiencia del quemador

La temperatura promedio de los gases de combustión medida en el quemador de hidrógeno es de 380°C, la eficiencia estimada sería:

$$\text{Eficiencia (\%)} = 100 * \frac{(380 \text{ °C} - 2822.2 \text{ °C})}{2822.2 \text{ °C}} \approx 86.5\%$$

En este caso, la eficiencia estimada del quemador de hidrógeno es del **86.5%**. Esto significa que el 13.5% de la energía potencial del hidrógeno no se convierte en calor útil, sino que se pierde en forma de otras formas de energía, como la radiación y la convección.

4.6 Eficiencia del quemador dentro de la interfaz

Como se mostró en la metodología número 3 cada una de las ecuaciones mencionadas se programaron en módulos de cálculo para obtener la eficiencia del quemador a partir de las temperaturas registradas por los termopares. En la Figura 32. Grafica de la Eficiencia Térmica se muestra la eficiencia térmica siendo una función con respecto al tiempo

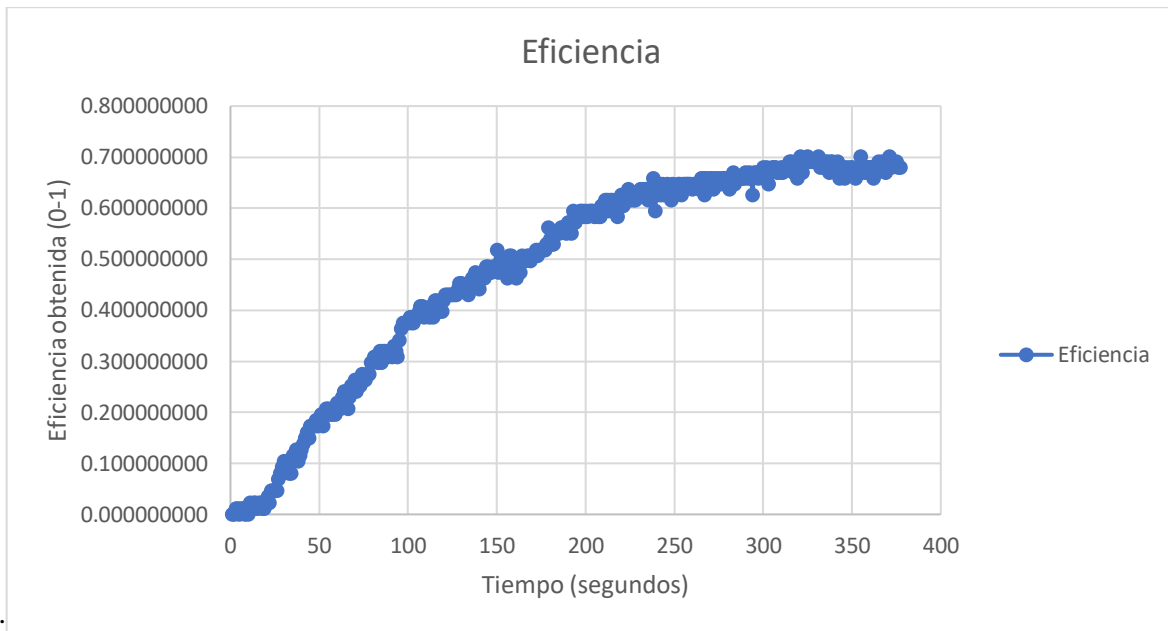


Figura 32. Grafica de la Eficiencia Térmica

4.7 Sostenimiento de la Temperatura

En cuanto al sostenimiento de la temperatura de igual forma como se mencionó en la metodología número 3 se realizó la secuencia de cálculo mostrada en ese apartado dentro de la interfaz, Simulink, para cada uno de los termopares en donde se pueden visualizar de manera gráfica en la interfaz realizada, por lo que en la Figura 33. Porcentaje de Error de cada termopar con respecto a la temperatura en estado estacionario, se muestran gráficamente cada uno de los termopares y como va cambiando su porcentaje de error con respecto al tiempo.

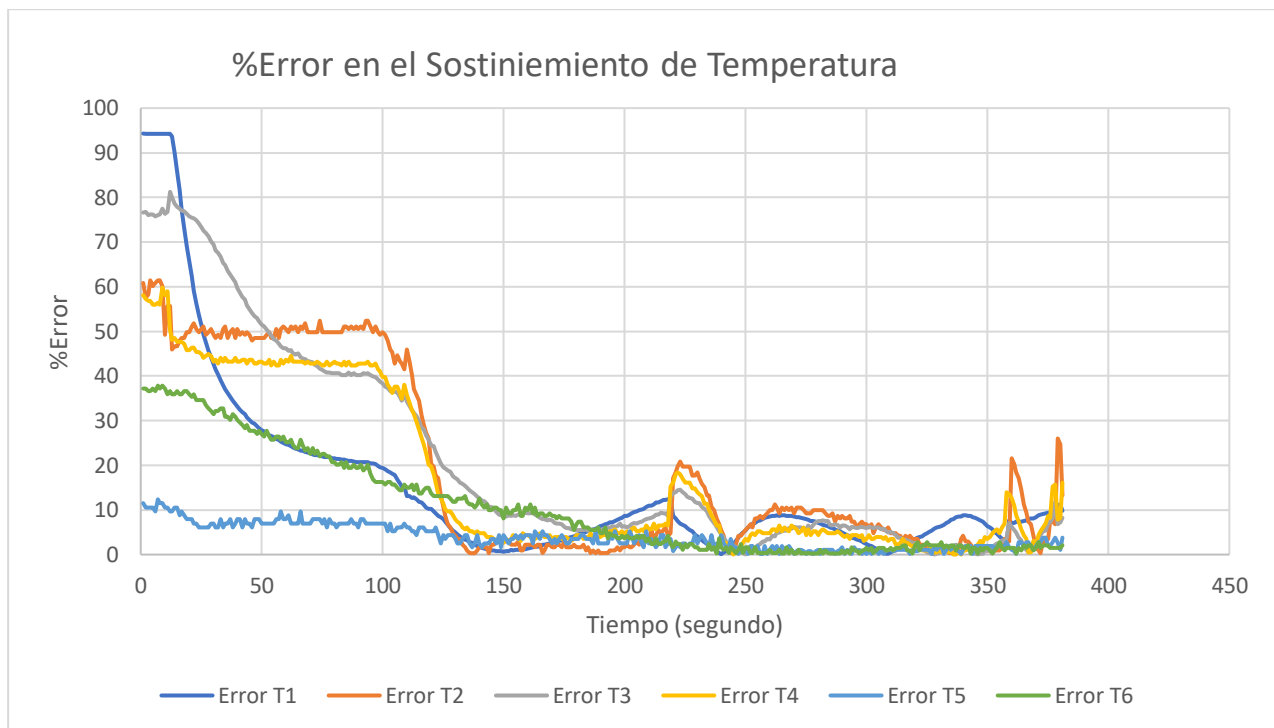


Figura 33. Porcentaje de Error de cada termopar con respecto a la temperatura en estado estacionario

4.8 Interfaz para la visualización de datos

El diseño de la interfaz utilizando MATLAB, particularmente Simulink, fue una fase crítica del proyecto, ya que permitió la visualización, el análisis y la interpretación profunda de los datos obtenidos del quemador de hidrógeno.

En un principio, se creó un modelo en Simulink que representaba de manera precisa el sistema de adquisición de datos del quemador. Este modelo abarcaba desde la recolección de datos hasta la presentación de resultados en una interfaz de usuario intuitiva. Para lograr esto, se emplearon bloques especializados de Simulink, diseñados para la comunicación con los datos, lo que facilitó la transferencia eficiente de datos.

Una vez que se logró la obtención de datos, se procedió a la lectura y procesamiento de los datos del sensor de temperatura. Aquí, se implementaron algoritmos de filtrado y técnicas de procesamiento de señales en Simulink para mejorar la precisión y la estabilidad de las lecturas de temperatura, permitiendo una captura más confiable y precisa de los datos.

Finalmente, se desarrolló una interfaz de usuario interactiva utilizando bloques gráficos en Simulink para la visualización de los resultados. Esto incluyó la creación de gráficos dinámicos en tiempo real que mostraban la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo, así como la implementación de indicadores visuales para identificar tendencias y anomalías en los datos como el uso de focos led los cuales encienden de un color rojo indicando que están llegando a su temperatura de trabajo máximo para así poder limitar los daños a estos, de igual forma se incluye un display donde se puede ver en tiempo real la temperatura marcada en cada termopar así como con un gráfico de medio gauge donde se mueve representando las temperaturas leídas. También, se muestran gráficamente las temperaturas leídas, así como el porcentaje de error que tienen con respecto a la temperatura en estado estacionario y finalmente se muestra la eficiencia del quemador.

En resumen, el diseño de la interfaz utilizando MATLAB, específicamente Simulink, proporcionó una plataforma robusta y versátil para la visualización y el análisis de datos en tiempo real del quemador de hidrógeno. Este enfoque integrado facilitó una comprensión profunda del comportamiento del sistema y abrió nuevas oportunidades para la optimización y el mejoramiento continuo del quemador.

Esto dio como resultado el siguiente diagrama donde se puede observar de manera gráfica el quemador con la llamada dentro del tubo donde se colocaron cada uno de los 6 termopares a las distancias previamente vistas en la Figura 5. Diagrama de conexión de termopares y placa Arduino

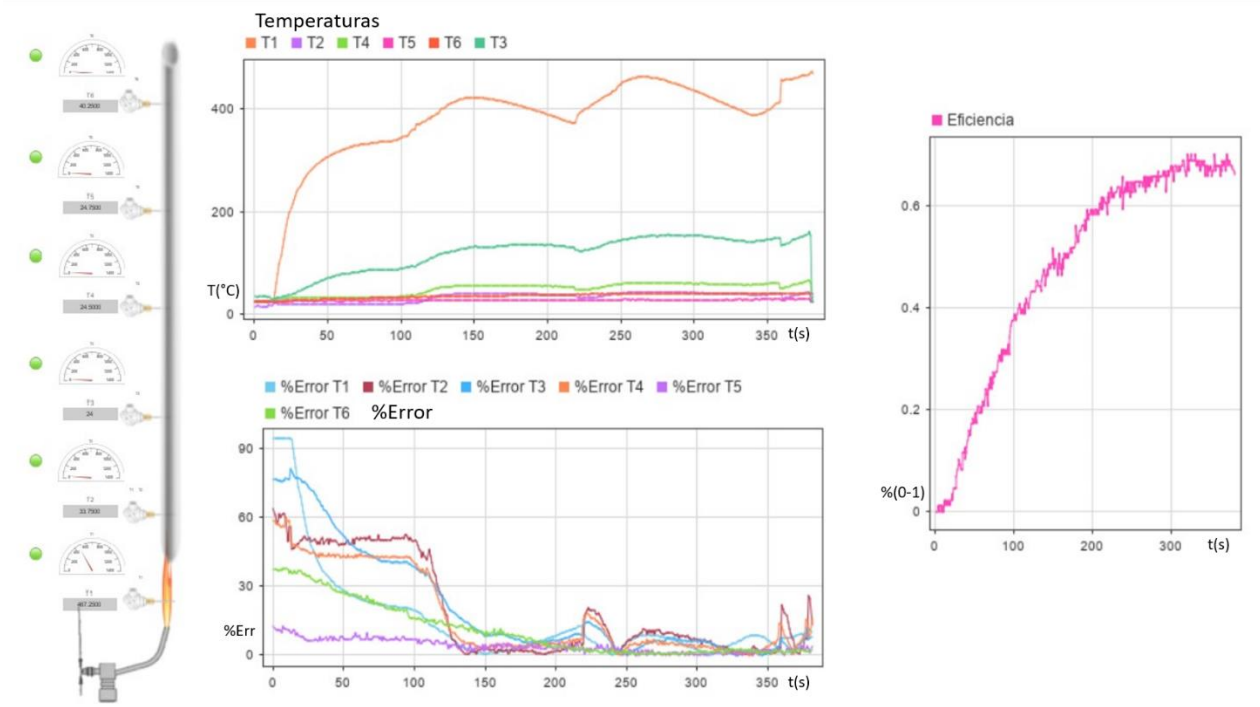


Figura 34. Interfaz en Simulink

Los datos obtenidos a través del monitoreo y análisis del quemador de hidrógeno proporcionan información valiosa que puede ser aprovechada para mejorar su diseño de varias maneras como:

Eficiencia y Optimización de la Combustión

La temperatura es un indicador clave del proceso de combustión en un quemador de hidrógeno. Una temperatura adecuada dentro del quemador es fundamental para garantizar una combustión eficiente y completa del hidrógeno, lo que a su vez afecta directamente la eficiencia energética y la emisión de contaminantes. Cuando la temperatura dentro del quemador es demasiado baja, puede haber una combustión incompleta, lo que conduce a la formación de productos de combustión no deseados, como monóxido de carbono (CO) o hidrocarburos no quemados. Estos productos de combustión parcial pueden reducir la eficiencia del proceso y generar emisiones contaminantes. Por otro lado, temperaturas demasiado altas pueden provocar la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x), que también son contaminantes atmosféricos y contribuyen al smog y la lluvia ácida. Los datos dentro de nuestro quemador de hidrógeno muestran temperaturas lo suficientemente altas para poder concluir que el quemador está llevando a cabo una combustión completa consumiendo el hidrógeno producido dentro del reactor.

Al obtener datos de temperatura dentro del quemador, es posible monitorear y controlar la temperatura para mantenerla dentro de un rango óptimo para una combustión eficiente y limpia del hidrógeno. Esto implica ajustar la relación aire-combustible, la distribución del flujo de combustible y aire, y otros parámetros operativos para garantizar que la temperatura en el interior del quemador sea la adecuada para una combustión completa.

La optimización de la temperatura dentro del quemador no solo mejora la eficiencia energética al garantizar una combustión más completa del hidrógeno, sino que también reduce las emisiones contaminantes al minimizar la formación de productos de combustión no deseados. Esto es especialmente importante en aplicaciones industriales donde se utilizan quemadores de hidrógeno para procesos de calentamiento, como en la industria química, la metalurgia y la fabricación de vidrio, donde la eficiencia energética y la reducción de emisiones son objetivos clave.

Seguridad Operativa

La monitorización de la temperatura en un quemador de hidrógeno es esencial para garantizar la seguridad operativa del sistema. Las temperaturas extremadamente altas pueden indicar condiciones de funcionamiento anormales que pueden representar un riesgo para la integridad del equipo y la seguridad

de las personas que trabajan en su entorno. Cuando se opera un quemador de hidrógeno, es crucial mantener las temperaturas dentro de límites seguros para prevenir el sobrecalentamiento y el riesgo de fallas catastróficas. La monitorización continua de la temperatura permite detectar cualquier aumento repentino o anomalía en la temperatura del quemador, lo que puede indicar una fuga de gas, una obstrucción en el sistema de suministro de aire o combustible o un mal funcionamiento del quemador. Al nosotros contar con la interfaz intuitiva y de fácil comprensión podemos notar en todo momento las temperaturas de combustión del hidrógeno notando gráficamente como en los momentos en donde el reactor se está quedando sin hidrógeno y empieza a producirlo las temperaturas de combustión bajan notablemente y suben en cuanto la cantidad de hidrógeno producido llega a su límite, así pudiendo notar que la producción del hidrógeno dentro del reactor también es un factor a considerar dentro de la combustión de este para así en futuras investigaciones de aplicación se puede tomar en cuenta que este es un factor determinante

Además, seguimiento automatizado de la temperatura puede ayudar a identificar puntos térmicos dentro del quemador que podrían representar un riesgo de incendio o explosión. Llevando a otro de los resultados relevantes de este trabajo de tesis en cuanto al comportamiento del quemador de hidrógeno, siendo que este tiene una transferencia de calor radial tan pequeña que esta puede ser despreciable pues al tener una separación radial menor a 1 centímetro el termopar no marcaba cambios de temperatura a pesar de estar en la misma posición axial del quemador mostrando así que el quemador de hidrógeno solo tiene un perfil de temperaturas únicamente en la dirección axial.

La detección temprana de estas condiciones peligrosas permite tomar medidas correctivas de manera oportuna, como detener la operación del quemador, activar sistemas de seguridad o realizar inspecciones y mantenimiento preventivo. La integración de sistemas de alarma y protección contra sobrecalentamiento basados en la monitorización de la temperatura es una práctica común en aplicaciones industriales donde se utilizan quemadores. Estos sistemas pueden activar alarmas audibles o visuales, cerrar válvulas de suministro de combustible o activar sistemas de extinción de incendios en caso de que se detecten condiciones de temperatura peligrosas dentro del quemador. Dando así paso a futuras adaptaciones a nuestro sistema de monitoreo agregando un sistema de control de este para poder tener una mayor seguridad pues sabiendo las temperaturas que nosotros deseamos podemos ajustar aperturas de válvulas y otros parámetros con una base de monitoreo visual de la quema de hidrógeno.

Validación de Modelos Teóricos

Los datos de temperatura obtenidos experimentalmente pueden utilizarse para validar modelos teóricos y simulaciones computacionales del comportamiento del quemador. Comparar los datos experimentales con las predicciones teóricas permite evaluar la precisión y confiabilidad de los modelos, identificar áreas de discrepancia y mejorar la comprensión del proceso de combustión de hidrógeno.

Optimización del Diseño del Quemador

La temperatura desempeña un papel fundamental en el diseño y la operación eficiente de los quemadores de hidrógeno. El monitoreo en tiempo real detallada de la temperatura dentro del quemador proporciona datos valiosos que pueden utilizarse para optimizar su diseño y mejorar su rendimiento en términos de eficiencia energética y reducción de emisiones.

1. **Diseño Geométrico:** La distribución de la temperatura dentro del quemador está estrechamente relacionada con su diseño geométrico, incluyendo la forma y tamaño de la cámara de combustión, la disposición de los inyectores de combustible y aire, y la configuración de los deflectores y mezcladores. La monitorización de la temperatura permite evaluar la efectividad de diferentes diseños y geometrías, identificando áreas donde se pueden hacer mejoras para lograr una distribución más uniforme del calor y una combustión más eficiente.
2. **Optimización de Parámetros Operativos:** Los datos de temperatura proporcionan información crucial sobre cómo los diferentes parámetros operativos, como la velocidad del flujo de combustible y aire, la relación aire-combustible y la presión de operación, afectan la temperatura dentro del quemador. Al realizar pruebas y ajustes sistemáticos de estos parámetros, es posible identificar las condiciones óptimas de operación que maximizan la eficiencia de la combustión y minimizan la formación de productos de combustión no deseados.
3. **Reducción de Puntos Calientes y Fríos:** La monitorización de la temperatura ayuda a identificar y mitigar posibles puntos calientes y fríos dentro del quemador, que pueden afectar negativamente al rendimiento y la durabilidad del equipo. La optimización del diseño del quemador y la distribución del flujo de combustible y aire pueden ayudar a minimizar los gradientes térmicos y garantizar una temperatura más uniforme en toda la cámara de combustión, lo que contribuye a una combustión más eficiente y una vida útil prolongada del quemador.

5 CONCLUSIONES

- En cuanto al desarrollo de estrategias innovadoras esta se logró alcanzar gracias a la implementación de nuestra interfaz la cual no solo se queda en la lectura de las temperaturas, sino que logra hacer cálculos en tiempo real como lo son la eficiencia del quemador así como del sostenimiento de la temperatura de cada uno de los termopares logrando así que se pueda hacer una toma de decisiones en tiempo real para el mejor aprovechamiento energético del combustible
- Se seleccionó una instrumentación precisa y confiable para el sistema de monitoreo, lo cual fue esencial para el éxito del proyecto. La elección del sensor de temperatura, permitió obtener datos precisos y consistentes, esenciales para el análisis térmico y la optimización del proceso de combustión.
- Se creó y programó un sistema de monitoreo térmico específico para un prototipo de quemador de hidrógeno. Este sistema tenía la capacidad de monitorear el proceso de combustión en tiempo real, incluyendo la temperatura de la llama. Así como la posibilidad de realizar los cálculos necesarios para saber la eficiencia en tiempo real del quemador, así como el sostenimiento de la temperatura que este tiene en las diferentes zonas.
- Se creó una interfaz de usuario intuitiva y eficiente para el procesamiento y visualización de los datos recopilados por el sistema de monitoreo. Esta herramienta permite a cualquier persona acceder fácilmente a información detallada sobre el rendimiento del quemador, facilitando la toma de decisiones informadas y rápidas para ajustar y optimizar el proceso de combustión.

La investigación no solo cumplió con los objetivos establecidos, sino que también estableció una base sólida para mejoras y aplicaciones futuras en el uso del hidrógeno como fuente de energía en quemadores atmosféricos. Los resultados obtenidos destacan la factibilidad y los beneficios de implementar tecnologías avanzadas de monitoreo y control en los sistemas de combustión de hidrógeno, lo que promueve la innovación y la sostenibilidad en el sector energético.

6 REFERENCIAS

- Abbasi, R., L., W., Wanke, SE, & Hayes, R. (2022). Kinetics of methane combustion over Pt and Pt-Pd Catalysts. *ELSEVIER*, 1930-1942.
- Abbasi, R., L., W., Wanke, S., & Hayes, R. (2022). Kinetics of methane combustion over Pt and Pt-Pd catalysts. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(11), 1930-1942.
- ACCIONA. (2020). El Hidrógeno Verde: La energía del futuro clace en ela descarbonización . *I*(1).
- Akbari, P. &. (2003). Performance Improvement of Small Gas Turbines Through Use of Wave Rotor Topping Cycles. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference*. (págs. 359-36). Atlanta, Georgia, USA: ASME.
- Alptekin, E., & Ichim, A. (2023). Monitoring and Control of Hydrogen Burners for Improved Combustion Efficiency and Emissions Reduction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1422-1434.
- Arsalis, A. (2019). Thermodynamic modeling and parametric study of a small-scale natural gas/hydrogen-fueled gas turbine system for decentralized applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36. doi:10.1016/j.seta.2019.100560
- Aydin, H., & Gupta, A. K. (2023). Experimental Investigation of Hydrogen Combustion in a Counterflow Burner with Different Fuel Injection Angles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3467-3479.
- Aydin, H., & Gupta, A. K. (2023). Experimental Investigation of Hydrogen Combustion in a Counterflow Burner with Different Fuel Injection Angles. . *International Journal of Hydrogen Energy*, 3467-3479.
- Bakalis, D., & Stamatis, A. (2013). Incorporating available micro gas turbines and fuel cell: Matching considerations and performance evaluation. *Applied Energy*, 103, 607-617. doi:10.1016/j.apenergy.2012.10.026
- Bauer, C., & Forest, T. (2001). EDelect of hydrogen addition on performance of methane-fueled vehicles. Part I: eDelect on S.I. engine performance. *International Journal Hydrogen Energy*, págs. 55-70.

- Baukal Jr., C. (2000). *Heat Transfer in Industrial Combustion* (1st ed ed.). CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9781420039757>
- Borghini, R., & Desriau, M. (1998). Combustion and flames. *I*(15).
- Boushaki, T., Dhué, Y., Selle, L., Ferret, B., & Poinso, T. (1 de November de 2012). Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane-air premixed flame: Experimental and numerical analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *37*(11), págs. 9412-9422. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.037>
- Breeze, P. (2019). Natural Gas-Fired Gas Turbine and Combined Cycle Power Plants. *Power Generation Technologies*, 71-97. doi:[10.1016/b978-0-08-102631-1.00004-3](https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102631-1.00004-3)
- Cappelletti, A., & Martelli, F. (2017). Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(15), págs. 10513-10523. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.104>
- Cardona Vargas, A., Amell Arrieta, A., & Arrieta, C. (2016). Combustion characteristics of several typical shale gas mixtures. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *33*, págs. 296-304. doi:[10.1016/j.jngse.2016.03.039](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.03.039)
- Carlson, E. C. (1996). Don't Gamble With Physical Properties For Simulations. *92*(10).
- CFE. (2022). *Sistema de Información Energética*. Obtenido de CONSUMO DE COMBUSTIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IIIA1C07>
- Chen, H., Zhu, M., & Wang, F. (2021). Optimization of Hydrogen Combustion in a Piloted Burner Using Genetic Algorithm. *Energy*, *129*, 120125.
- Chen, J., Longfei, Y., & Wenya, S. (2015). Hydrogen-Assisted Catalytic Ignition Characteristics of Propane-Air with a Chemical Kinetic Model in a Pt-Al₂O₃ Micro-Combustor in Different Feeding Modes. *RSC Advances*, *5*, *5*(19), págs. 14720-14734. doi:<https://doi.org/10.1039/c4ra10887f>
- Darwish, M. (2013). Towards Energy Conservation in Qatar. *Open Journal of Energy Efficiency*, *2*, págs. 176-191. doi:[10.4236/ojee.2013.24023](https://doi.org/10.4236/ojee.2013.24023)

- de Santoli, L., Paiolo, R., & Lo Basso, G. (2017). An overview on safety issues related to hydrogen and methane blend applications in domestic and industrial use. *Energy Procedia*, 126(27), págs. 297-304. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.224>
- Delgado-Torres, A. M. (2019). The effects of the ideal gas model with constant heat capacities on fuel efficiency optimization of the open-cycle gas turbine. *Energy Conversion and Management*, 195, 198-209. doi:10.1016/j.enconman.2019.04.088
- Desideri, U. (2013). Fundamentals of gas turbine cycles: thermodynamics, efficiency and specific power. *Modern Gas Turbine Systems*, 44-85. doi:10.1533/9780857096067.1.44
- Dipak K., S. (2015). Chapter 3 - Fuels and Combustion. En S. Dipak K., *Thermal Power Plant*.
- Dipak K., S. (2015). Chapter 7 - Gas Turbine and Heat Recovery Steam Generator. En S. Dipak K., *Thermal Power Plant* (págs. 239-283). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801575-9.00007-X>
- D'Souza, A., & Dryer, F. L. (2020). Advanced Monitoring and Control Strategies for Hydrogen Combustion Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 77, 100847.
- Duan, X., Li, Y., Liu, Y., Zhang, S., Guan, J., & Lai, M.-C. (2020). Dilution gas and hydrogen enrichment on the laminar flame speed and flame structure of the methane/air mixture. *Fuel*, 281(118794). doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118794>
- Energy Information Administration (EIA). (2022). *February 2022, Monthly Energy Review*. Washington, DC: Office of Energy Statistics.
- Evaristo, G. (1979). Medición de temperaturas con termopares. *I*(1).
- Fabrega, E., & Rendé, B. (2020). Desarrollo de un modelo de funcionamiento de electrolizadores alcalinos autopresurizados. En E. Fabrega, & B. Rendé, *Desarrollo de un modelo de funcionamiento de electrolizadores alcalinos autopresurizados* (Vol. I). Buenos Aires: ITBA.
- Flórez, D. A. (2021). Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de gas natural y gas natural-syngas. *II*(20).
- Funke, H. H.-W., Keinz, J., Börner, S., Hendrick, P., & Elsing, R. (2016). Testing and analysis of the impact on engine cycle parameters and control system modifications using hydrogen or

methane as fuel in an industrial gas turbine. *EUCASS Proceedings Series - Advances in AeroSpace*, 8, 409-426. doi:10.1051/eucass/201608409

García, J. C. (26 de Noviembre de 2012). *Ingeniería Química.NET*, 1. (Ingeniería Química.NET) Recuperado el 17 de Febrero de 2024, de IngenieríaQuímica.NET: <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/302-produccion-de-hidrogeno-mediante-electrolizadores-estado-del-arte-de-la-tecnologia-electrolizadore>

García, J., & Amell, A. (2006). Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno. *I*(20).

Giménez, I. (2021). Retos del hidrógeno verde. *I*(2).

Gómez, E., & Llanos, D. (2013). Incidencia de la humedad del aire sobre las emisiones de monóxido de carbono en un quemador atmosférico de gas. *II*(3).

Hermanns, R., Konnov, A., Bastiaans, R., de Goey, L., Lucka, K., & Köhne, H. (2010). Effects of temperature and composition on the laminar burning velocity of CH₄ + H₂ + O₂ + N₂ flames. *Fuel*, 89, págs. 114-121. doi:10.1016/j.fuel.2009.08.010

Hoekstra, R. (1995). Experimental study of a clean burning vehicle fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20(9), 737-745. doi:10.1016/0360-3199(95)00008-2

Hweeung, K., & Bonchan, K. (2024). Integrated hydrogen production strategy based on multi-objective optimization considering carbon dioxide emission reduction goals. *Applied Thermal Engineering*, 1359-4311.

IEA. (2020). *How electricity is generated*. Obtenido de <http://www.eia.gov/energyexplained/electricity/how-electricity-is-generated.php>

International Gas Union, Petroleum, B. (2011). *Guidebook to gas interchangeability and gas quality*.

International Energy Agency. (2021). *Electricity Information: Overview*. Obtenido de IEA: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>

International Energy Agency. (14 de Marzo de 2022). *International Energy Agency*. Obtenido de International Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>

IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Switzerland: IPCC.

- J, W. (1984). Rate Coefficients in the C / H / O System. En W. J, *Rate Coefficients in the C / H / O System* (Vol. IV, págs. 197-360). New York: Springer-Verlag.
- Jarunghammachote, S. (2019). Simplified Model for Estimations of Combustion Products, Adiabatic Flame Temperature and Properties of Burned Gas. *Thermal Science and Engineering Progress*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100393>
- JM Industrial Technology . (2024). *JM Industrial*, 1. (JM Industrial) Recuperado el 8 de Febrero de 2024, de JM Industrial: <https://www.jmi.com.mx/literatura/blog/item/39-tipos-y-aplicaciones-de-los-termopares.html>
- Junta de Castilla y León. (2021). *JCYL*. (Gobierno de Castilla) Recuperado el 7 de Febrero de 2024, de JCYL: <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/combustible-hidrogeno.html>
- Juste, G. (2006). Hydrogen injection as additional fuel in gas turbine combustor. Evaluation of effects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(14), 2112-2121. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.02.006
- Kan, S., Chen, B., Wu, X., Chen, Z., & Chen, G. (2019). Natural gas overview for world economy: From primary supply to final demand via global supply chains. *Energy Policy*, 124, págs. 215-225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.002>
- Kaushik, S., & Ranjan, D. (2020). Numerical Investigation of Hydrogen Combustion in a Counterflow Burner with Different Inlet Velocity Ratios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20978-20991.
- Kays, M., & Louis, A. (1998). *Compact Heat Exchangers*. Michigan: Krieger Publishing Company.
- Khoshnood, A., & Dryer, F. L. (2020). Review of catalytic combustion of hydrogen and synthesis gas. *Progress in Energy and Combustion Science*, 79, 100819.
- Kumar, P., Ravindra, V., Ramachandra, R., & Ravi Kumar, N. (2016). Simulation and Parametric Optimisation of Thermal Power Plant Cycles. *Perspectives in Science* 8, 304(6). doi:<https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.060>
- Lahiani, A., Melfteh-Wali, S., Shahbaz, M., & Vinh Vo, X. (1 de November de 2021). Does financial development influence renewable energy consumption to achieve carbon neutrality in the USA? *Energy Policy*, 158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112524>

- Larsen, J. F., & Wallace, J. S. (1997). Comparison of Emissions and Efficiency of a Turbocharged Lean-Burn Natural Gas and Hythane-Fueled Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 119(1), 218. doi:10.1115/1.2815553
- Law, C. K. (2010). CHEMICAL THERMODYNAMICS. *Combustion Physics*, 14–50. doi:doi:10.1017/cbo9780511754517.003
- Li, G., Wang, H., & Chen, L. (2021). Recent progress in premixed hydrogen burner technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 85,100882.
- Li, H., Li, Z., & Wang, Q. (2021). evelopment of a Condition Monitoring System for Hydrogen Burners. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27482-27493.
- Li, Q., Hu, G., Liao, S., Cheng, Q., Zhang, C., & Yuan, C. (2014). Kinetic Effects of Hydrogen Addition on the Thermal Characteristics of Methane Air Premixed Flames. *Energy & Fuels*, 28(6), 4118-4129. doi:10.1021/ef500263v
- Li, X., Wang, H., & He, X. (2023). Experimental and Numerical Investigation of Hydrogen Combustion in a Double-Swirl Burner. *Fuel Processing Technology*, 226, 107467.
- Li, Y., & Weng, Y. (2011). Performance study of a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system designed for methane operating with non-designed fuels. *196*(8).
- Li, Y., & Weng, Y. (2011). Performance study of a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system designed for methane operating with non-desing fuels. *Journal of Power Sources*, 196(8), págs. 3824-3835. doi:https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.011
- Liu, Y., Li, Z., & Wang, X. (2022). Experimental Study on the Combustion Characteristics of Hydrogen in a Counterflow Burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24654-24667.
- Logan, B. (2004). Extracting hydrogen and electricity from renewable. *I*(38).
- M. Reyes, F. T. (2021). Combustion and Flame Front Morphology Characerization of H₂-CO Syngas Blends in Constan Volume Combustion Bombs. *Energy & Fuels*, 3497-3511.
- Marin, R. (2008). Materiales y estructuras cerámicas para el diseño de quemadores de gas. *47*(5).
- Mathieu, O., Mulvihill, C. R., & Petersen, E. L. (2019). Assessment of modern detailed kinetics mechanisms to predict CO formation from methane combustion using shock-tube laser-

absorption measurements. *Fuel*, 236, 1164-1180.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.029>.

Md Nur Alam Mondal, N. K. (2023). Numerical investigation of premixed hydrogen/air combustion at lean to ultra-lean conditions and catalytic approach to enhance stability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18100-18115.

Mendoza, A. (2006). El hidrógeno y la energía. *13*(1).

Meyer, G., & Caneiro, A. (2004). Cento atómico Bariloche y la tecnología del hidrógeno . *1*(1).

Mikulski, M., & Wierzbicki, S. (2016). Numerical investigation of the impact of gas composition on the combustion process in a dual-fuel compression-ignition engine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, págs. 525-537. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.03.0747>

Miranda, P. (2018). *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. USA: AP.

Nam, H. T., Lee, S., & Jung, H. (2023). Effect of hydrogen addition on combustion and thermal characteristics of impinging non-premixes jet flames for various heating value gases. *Case Studies in Thermal Engineering*, 103-173.

Neilson, C. E. (1998). LM2500 gas turbine modifications for biomass fuel operation. *Biomass and Bioenergy*, 15(3), 269-273. doi:10.1016/S0961-9534(98)00021-X

NFPA. (2019). 85 - Código de Riesgos de Sistemas de Combustión y Calderas. Obtenido de <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=85&year=2019>

Okawa, T., Asano, H., Ito, K., Mori, S., Umekawa, H., Matsumoto, R., . . . Ito, D. (2021). 3 - Fundamentals for power engineering. En Y. Koizumi, T. Okawa, & S. Mori, *Fundamentals of Thermal and Nuclear Power Generation* (págs. 77-226). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820733-8.00003-0>

OMEGA TM. (2013). *OMEGA*, 6.020. (OMEGA) Recuperado el 8 de Febrero de 2024, de OMEGA: <https://mx.omega.com/prodinfo/termopar.html>

Ortenzi, F. C. (2008). Experimental tests of blends of hydrogen and natural gas in light-duty vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(12), 3225-3229. doi:10.1016/j.ijhydene.2008.01.050

- Ozan, K., Mustafa, I., & Serhat, K. (2024). Hydrogen concentration effects on a swirl-stabilized non-premixed burner using ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1288-1305.
- Öztuma, S., & Büyükakin, M. (2019). Effects of hydrogen enrichment of methane on diffusion flame structure and emissions in a back-pressure combustion chamber. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.187>
- Palies, P. (2020). 2 - Premixed combustion for combustors. En P. Palies, *Stabilization and Dynamic of Premixed Swirling Flames* (págs. 57-103). Academic Press.
- Paykani, A., Frouzakis, C., & Boulouchos, K. (2019). Numerical optimization of methane-based fuel blends under engine-relevant conditions using a multi-objective genetic algorithm. *Applied Energy*, 242, págs. 1712-1724. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.041>
- Peña, E. (n.d.). Diagrama del Equipo. *Diagrama del Equipo*. BUAP, Puebla.
- Petersen, E. L. (October de 2007). Ignition of Lean Methane-Based Fuel Blends at Gas Turbine Pressures. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 129, 937-944. doi:10.1115/1.2720543
- Prade, B. (2013). 10 - Gas turbine operation and combustion performance issues. En P. Jansonh, *Modern Gas Turbine Systems* (págs. 383 - 423). Woodhead Publishing.
- R, S. (2012). An Introudcion to Combustion. En S. R. Turns, *An Introudcion to Combustion* (Vol. III, pág. 10). New York: McGraw-Hill.
- Rafael, J. (2020). Modelo dinamico de un electrolizador alcalino. *I*(1).
- Rahbar, K., Mahmoud, S., & Al-Dadah, R. K. (2016). Mean-line modeling and CFD analysis of miniature radial turbine for distributed power generation systems. *II*(2).
- Rajpara, P., Shah, R., & Banerjee, J. (2018). Effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of methane fuelled upward swirl can combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(36), págs. 17505-17519. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.111>
- Resende, P., Morais, L., Pinho, C., & Afonso, A. (2022). Combustion Characteristics of Premixed Hydrogen/Air in an Undulate Microchannel. *Energies*, 15, 626.

- Restrepo, A. (2023). *Estudio Numérico y experimental del efecto de la combustión del gas natural y el hidrógeno en un quemador*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Reyes, J., & Bermudez, A. (2023). ecnologías de quemadores de hidrógeno para aplicaciones industriales. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 423-435.
- Roldán, J. A. (29 de Abril de 2023). *Linkedin*, 2.3. (Linkedin) Recuperado el 17 de Febrero de 2024, de *Linkedin*: <https://es.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-se-produce-de-la-combusti%C3%B3n-hidr%C3%B3geno-descubre-y-rold%C3%A1n-garc%C3%ADa#:~:text=La%20combusti%C3%B3n%20de%20hidr%C3%B3geno%20es,calentar%20edificios%20y%20mucho%20m%C3%A1s>.
- Samir, S. (2023). *Fuels and Combustion*.
- Sannino, R., & Gimelli, A. (2017). Thermodynamic model validation of Capstone C30 micro gas turbine. *72° Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association*. 126. Italy: Energy Procedia.
- Schmidt, O., & Mukerjee, S. (2022). A review of hydrogen burner technologies for combustion applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24223-24252.
- Secretaría de Energía. (7 de Febrero de 2020). ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN PARA PROMOVER EL USO DE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES MÁS LIMPIOS. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 10-113. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020
- Shih, H.-Y., & Liu, C.-R. (2014). A computational study on the combustion of hydrogen/methane blended fuels for a micro gas turbines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(27), págs. 15103-15115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.046>
- Sistema de Energía. (2020). *Balance Nacional de Energía*. México: Dirección General de Planeación e Información Energéticas.
- Soto, P. (2002). Cálculo de la temperatura en el interior de la cámara de combustión en motores de combustión interna. *II*(2), 7-15.
- Spadaccini, L., & Colket, M. (1994). IGNITION DELAY CHARACTERISTICS OF METHANE FUELS. *Progress in Energy and Combustion Science*, 20(5), 431-460. doi:10.1016/0360-1285(94)90011-6

- Speight, J. G. (2020). Combustion of Hydrocarbons. En J. G. Speight, *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes* (págs. 421-463). doi:10.1016/b978-0-12-809923-0.00010-2
- Stiesch, G. (2003). *Modeling Engine Spray and Combustión Processes*. New York: Springer.
- Swain, M., Yusuf, M., Dulger, Z., & Swain, M. (1993). The effects of hydrogen addition on natural gas engine operation. *SAE*.
- Taamallah, S., Vogiatzaki, K., Alzahrani, F., Mokheimer, E., Habib, M., & Ghoniem, A. (2015). Fuel Flexibility, Stability and Emissions in Premixed Hydrogen-Rich Gas Turbine Combustion: Technology, Fundamentals, and Numerical Simulations. *APPLIED ENERGY*, 154(1020-47). doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.044>
- Tahan, M., Tsoutsains, E., Muhammad, M., & Abdul Karim, Z. (2017). Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: a review. *Appl. Energy*, 198, págs. 122-144. doi:10.1016/j.apenergy.2017.04.048
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Paris Agreement*. Obtenido de https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf
- Uribe Salazar, E., Herrera Mínera, B., & Bedoya Caro, I. (2019). Theoretical, numerical and experimental study of interchangeability of natural gas in Antioquia. *DYNA*, 86(208), págs. 346-354. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.75116>
- Vanblarigan, P. (1998). A hydrogen fuelled internal combustion engine designed for single speed/power operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(7), págs. 603-609. doi:10.1016/s0360-3199(97)001000-6
- Varón, J. (2005). Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz. 25(12).
- Wang, J., Huang, Z., Tang, C., Miao, H., & Wang, X. (2009). Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane-air mixtures combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), 1084-1096. doi:10.1016/j.ijhydene.2008.11.010
- Wei Du, S. Z. (2022). Experiment and numerical study of the combustion behavior of hydrogen-blended natural gas in swirl burners. *Case Studies in Thermal Engineering*, 102468.

- Westbrook, C. K., & Dryer, F. L. (1981). Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames. 27(1-2).
- Xu, S., Tu, Y., Huang, P., Luan, C., Wang, Z., Shi, B., & Liu, Z. (2020). Effects of Wall Temperature on Methane MILD Combustion and Heat Transfer Behaviors with Non-Preheated Air. *Applied Thermal Engineering*(174), 110-115. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115282
- YOKOGAMA. (17 de Mayo de 2017). *YOKOGAMA*, 1.3. (YOKOGAMA) Recuperado el 17 de Febrero de 2024, de YOKOGAMA: <https://www.yokogawa.com/br/library/resources/media-publications/improving-fired-heater-performance/>
- Zhang, Y., & Jiang, Y. (2019). Fault Detection and Diagnosis of Hydrogen Burners Using Machine Learning. *International Journal of Hydrogen Energy*, 14262-14272.
- Zhang, Y., Sun, Y., & He, X. (2023). Numerical Investigation of Hydrogen Combustion in a Dual-Swirl Burner with Different Fuel Jet Positions and Swirl Angles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4567-4580.
- Zhou, H., Li, X., Chen, Y., Kang, Y., Liu, D., & Liu, F. (2019). Combustion performance and mechanisms of the fuel/air mixture in a new separated swirl combustion system. *Fuel*, 258, 116058. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116058>.

