

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE PUEBLA



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL  
ENTORNO EXPERIMENTAL DE UN  
SISTEMA DE GENERACIÓN Y  
COMBUSTIÓN DE HIDRÓGENO”

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

**L.F. Juan Carlos Pichardo Aponte**

DIRECTOR

Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

CODIRECTOR

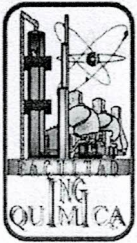
Dra. Mayra Ruíz Reyes



Septiembre de 2025



# BUAP



**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**Facultad de Ingeniería Química**  
**Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado**  
**Maestría en Ingeniería Química**

Acta de registro de tema de tesis			
<b>Fecha: 12/03/2024</b>			
<b>Estudiante</b>			
<b>Nombre</b>	Juan Carlos Pichardo Aponte		<b>Firma:</b>
<b>Matrícula:</b>	223470627	<b>Correo electrónico:</b>	pa223470627@alm.buap.mx
<b>CVU:</b>	1294465	<b>Teléfono móvil:</b>	2212644054
<b>Título de la tesis</b>			
Modelación y Simulación del Entorno Experimental de un Sistema de Generación y Combustión de Hidrógeno			
<b>Director</b>			
<b>Nombre:</b>	Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre		<b>Firma:</b>
<b>ID:</b>	100426277	<b>Correo electrónico</b>	francisco.pacheco@correo.buap.mx
<b>CVU:</b>	363598	<b>Teléfono móvil:</b>	2221521250
<b>Adscripción:</b>	Facultad de Ingeniería Química, BUAP		
<b>Codirector</b>			
<b>Nombre:</b>	Dra. Mayra Ruiz Reyes		<b>Firma:</b>
<b>ID:</b>	10049654 <del>34</del>	<b>Correo electrónico</b>	mayra.ruiz@correo.buap.mx
<b>CVU:</b>	166950	<b>Teléfono móvil:</b>	2223563633
<b>Adscripción:</b>	Facultad de Ingeniería Química, BUAP		



NOTA IMPORANTE: El tema, director y codirector de tesis serán avalados por el Comité Académico de Posgrado



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS**

Nombre del (de la) estudiante: Juan Carlos Pichardo Aponte

Matrícula: 223470627

Nombre del director: DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

Nombre del codirector: DRA. MAYRA RUÍZ REYES

**Título de la Tesis:**

“MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL ENTORNO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN Y  
COMBUSTIÓN DE HIDRÓGENO”

**Comisión Revisora:**

Presidente: Dr. Irving Israel Ruíz López

Firma: \_\_\_\_\_

Secretario(a): Dr. Adán Luna Flores

Firma: \_\_\_\_\_

Vocal (1): Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

Firma: \_\_\_\_\_

Vocal (2): Dra. Mayra Ruíz Reyes

Firma: \_\_\_\_\_

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de maestría que presenta el (la) estudiante arriba indicado, por lo que **estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el (la) estudiante presente su defensa y examen de grado en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.**

Fecha de examen: 25 de septiembre de 2025

Hora: 11:00 a.m.

Día de la semana: Jueves

Lugar: FIQ 7-301



Indicaciones: Entregar original para su revisión y autorización en la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado (SIEP). La copia de este documento deberá ser incluida en la tesis empastada y en su versión electrónica.

Revisa y Autoriza: Sello de la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado. - FIQ.- BUAP



**BUAP**

Oficio: FIQ/SIEP/037/2025

**Mtro. Juan Manuel Rosas Tapia**  
**Director de la Dirección de Administración Escolar**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**PRESENTE**

Reciba un afectuoso saludo y al mismo tiempo me permito presentar a usted a los integrantes del jurado de examen que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Química sustentará:

**Juan Carlos Pichardo Aponte**

perteneciente a la generación 2023 con número de matrícula 223470627 y cuyo tema de tesis es: "MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL ENTORNO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN Y COMBUSTIÓN DE HIDRÓGENO".

Dicho jurado está integrado por:

**JURADO**

Presidente  
Secretario  
Vocal  
Vocal

Dr. Irving Israel Ruíz López  
Dr. Adan Luna Flores  
Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre  
Dra. Mayra Ruíz Reyes

Asimismo, comunico a usted que el alumno cumple con todos los requisitos para poder llevar a cabo su examen de grado, y que los integrantes de este jurado están citados con anticipación para la fecha y lugar indicados a continuación.

FECHA DE EXAMEN: 25 de septiembre de 2025  
HORA: 11:00 horas  
LUGAR: Edificio FIQ7/301  
DÍA: jueves

Sin otro particular, me es grato quedar de usted.

Atentamente,

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Z. a 18 de septiembre de 2025

**Dra. Esmeralda Vidal Robles**  
Secretaria de Investigación y Estudios de Posgrado



c.c.p. Archivo

E-mail: esmeralda.vidal@correo.buap.mx

Facultad  
de Ingeniería  
Química

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

# Agradecimientos

La realización y finalización de este trabajo no habría sido posible sin el apoyo incondicional de mis padres, es por ello que deseo agradecer a mi madre Sagrario Aponte Saínos y a mi padre Juan Carlos Pichardo Macías por haberme apoyado, ayuda en todo momento durante estos dos años de estudio de posgrado.

A mis directores de tesis el Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre y la Dra. Mayra Ruíz Reyes por su tiempo, apoyo, guía y paciencia que mostraron durante los dos años del desarrollo de este proyecto de investigación.

A las amistades que formé durante estos dos años; Alejandra Berenice Galindo Rodríguez, Erick Peña Dorantes y quien se volvió una de mis mejores amigas Dafne Yahaira Muñoz Sarmineto, quien no solo me dio su amistad sino también su ayuda durante este proyecto.

A mis amigos que estuvieron ahí cuando necesitaba distraerme y que me escucharon; Javi, Nay, Sergio, Erick, Gama y a mi otra mejor amiga Dana Gonzáles.

Finalmente, agradecer a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (*SECIHTI*) por la beca otorgada para la realización de este proyecto de investigación.

*“Es como en las grandes historias, señor Frodo. Las que realmente importan. Estaban llenas de oscuridad y peligro. Y a veces no querías saber el final...porque ¿cómo podía ser feliz? ¿Cómo podía el mundo volver a ser como era cuando habían sucedido tantas cosas malas? Pero al final, es solo algo pasajero...esta sombra. Incluso la oscuridad debe pasar“*

Peter Jackson. El señor de los Anillos: Las dos torres (2002)

# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Marco teórico</b>	<b>3</b>
1.1 Características del gas hidrógeno y métodos de producción . . . . .	3
1.2 Electrólisis del agua . . . . .	5
1.3 Modelación de sistemas de producción electrolítica . . . . .	12
1.4 Problemas de almacenamiento de hidrógeno . . . . .	16
1.5 Deflagraciones y detonaciones . . . . .	17
1.6 Modelación de fenómenos de detonación de hidrógeno . . . . .	18
<b>2 Hipótesis</b>	<b>22</b>
<b>3 Objetivos</b>	<b>23</b>
3.1 Objetivo General . . . . .	23
3.2 Objetivos Específicos . . . . .	23
<b>4 Metodología</b>	<b>24</b>
4.1 Objetivo General . . . . .	24
4.2 Objetivo 1 . . . . .	25
4.2.1 Selección preparación y verificación del equipo prototipo . . . . .	26

4.2.2	Caracterización de parámetros operativos . . . . .	28
4.3	Objetivo 2 . . . . .	32
4.3.1	Relación Flujo-Presión . . . . .	33
4.3.2	Presión de detonación . . . . .	34
4.3.3	Deflagración en escenario de <i>backfire</i> . . . . .	36
4.4	Objetivo 3 . . . . .	38
4.5	Objetivo 4 . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>43</b>
5.1	Objetivo 1 . . . . .	43
5.1.1	Selección preparación y verificación del equipo prototipo. . . . .	43
5.1.2	Presión de descarga . . . . .	45
5.1.3	Flujo volumétrico . . . . .	51
5.1.4	Composición . . . . .	57
5.1.5	Velocidad de fluido compresible . . . . .	58
5.1.6	Temperatura . . . . .	63
5.2	Objetivo 2 . . . . .	65
5.2.1	Relación flujo-presión . . . . .	65
5.2.2	Presión de detonación . . . . .	71
5.2.3	Deflagración en escenario de <i>backfire</i> . . . . .	76
5.3	Objetivo 3 . . . . .	79
5.4	Objetivo 4 . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>95</b>
<b>A</b>	<b>Datos y estadísticas pruebas experimentales objetivo 1</b>	<b>97</b>
A.1	Pruebas presión de descarga . . . . .	97
A.2	Pruebas de Flujo volumétrico . . . . .	104

A.3	Cálculo de densidad de gas . . . . .	109
A.4	Pruebas de Velocidad media de fluido compresible . . . . .	111
A.5	Pruebas de Temperatura . . . . .	116
<b>B</b>	<b>Datos y estadísticas pruebas experimentales Objetivo 2</b>	<b>119</b>
B.1	Relación-flujo presión . . . . .	119
B.2	Presión de detonación . . . . .	125
B.3	Presión de deflagración en escenario de <i>backfire</i> . . . . .	127
	<b>Bibliografía</b>	<b>131</b>

## Índice de figuras

1.1	Cantidad de energía para electrólisis . . . . .	8
1.2	Voltaje vs temperatura . . . . .	9
1.3	Voltaje vs presión . . . . .	10
4.1	Metodología objetivo específico 1 . . . . .	26
4.2	Amperímetro y regla de medición de nivel de electrolito . . . . .	27
4.3	Diseño de arreglo experimental pruebas de presión . . . . .	28
4.4	Diseño de arreglo experimental pruebas de flujo volumétrico. . . . .	30
4.5	Diseño de arreglo experimental pruebas de temperatura . . . . .	32
4.6	Diagrama de flujo objetivo 2 . . . . .	33
4.7	Propuesta experimental relación flujo-presión . . . . .	34
4.8	Esquema 3D plataforma de detonación . . . . .	35
4.9	Sistema coordinado de medición . . . . .	36
4.10	Diagrama arreglo experimental deflagración . . . . .	37
4.11	Diagrama de flujo algoritmo de solución . . . . .	39
5.1	Diagrama <i>2D</i> del equipo de reacción . . . . .	43
5.2	Diagrama <i>3D</i> del equipo de reacción . . . . .	44
5.3	Sistema experimental presión de descarga . . . . .	45
5.4	Comportamiento presión absoluta de descarga . . . . .	46

5.5	Comportamiento presión absoluta de descarga . . . . .	47
5.6	Regresión lineal presión de descarga . . . . .	48
5.7	Comportamiento presión absoluta de descarga apertura $40^\circ$ . . . . .	49
5.8	Comportamiento presión absoluta de descarga promedio apertura $40^\circ$ . . . . .	49
5.9	Comportamiento presión absoluta de descarga apertura $50^\circ$ . . . . .	50
5.10	Comportamiento presión absoluta de descarga promedio apertura $50^\circ$ . . . . .	51
5.11	Sistema experimental flujo volumétrico . . . . .	52
5.12	Comportamiento flujo volumétrico de descarga . . . . .	53
5.13	Comportamiento flujo volumétrico promedio de descarga . . . . .	53
5.14	Regresión lineal flujo volumétrico . . . . .	54
5.15	Comportamiento flujo volumétrico de descarga apertura de $40^\circ$ . . . . .	55
5.16	Comportamiento flujo volumétrico de descarga promedio apertura de $40^\circ$ . . . . .	55
5.17	Comportamiento flujo volumétrico de descarga apertura de $50^\circ$ . . . . .	56
5.18	Comportamiento flujo volumétrico de descarga promedio apertura de $50^\circ$ . . . . .	57
5.19	Comportamiento velocidad de flujo de descarga . . . . .	59
5.20	Comportamiento velocidad de flujo de descarga . . . . .	59
5.21	Regresión lineal velocidad de flujo . . . . .	60
5.22	Comportamiento velocidad de flujo apertura de $40^\circ$ . . . . .	61
5.23	Comportamiento velocidad de flujo promedio apertura de $40^\circ$ . . . . .	61
5.24	Comportamiento velocidad de flujo apertura de $50^\circ$ . . . . .	62
5.25	Comportamiento velocidad de flujo apertura de $50^\circ$ . . . . .	63
5.26	Arreglo experimental pruebas temperatura . . . . .	64
5.27	Comportamiento de la temperatura respecto del tiempo . . . . .	64
5.28	Sistema experimental flujo-presión . . . . .	65
5.29	Desplazamiento volumétrico apertura de $40^\circ - 50^\circ$ . . . . .	66
5.30	Regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de $40^\circ$ . . . . .	67

5.31	Regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 50° . . . . .	68
5.32	Extracto sistema experimental flujo-presión . . . . .	69
5.33	Desplazamiento volumétrico apertura 90° – 180° . . . . .	69
5.34	Regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 90° . . . . .	70
5.35	Regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 180° . . . . .	71
5.36	Burbuja en plataforma de detonación . . . . .	72
5.37	Intensidad acústica detonación 0.002 dm <sup>3</sup> . . . . .	74
5.38	Sobrepresión de detonación 0.002 dm <sup>3</sup> . . . . .	74
5.39	Intensidad acústica detonación 0.004 dm <sup>3</sup> . . . . .	75
5.40	Sobrepresión de detonación 0.004 dm <sup>3</sup> . . . . .	76
5.41	Arreglo experimental pruebas de deflagración . . . . .	76
5.42	Comportamiento de la deflagración durante <i>backfire</i> . . . . .	77
5.43	Análisis de intensidad lumínica durante <i>backfire</i> . . . . .	78
5.44	Relaciones matemáticas entorno experimental . . . . .	80
5.45	Reporte de resultados simulación . . . . .	81
5.46	Presión de operación respecto del tiempo simulación . . . . .	82
5.47	Energía respecto del tiempo simulación . . . . .	82
5.48	Volumen acumulado del tiempo simulación . . . . .	83
5.49	Relación flujo-presión simulación . . . . .	84
5.50	Interfaz de usuario cálculo instantánea . . . . .	85
5.51	Resultados de cálculo instantáneo de flujo de gas combustible . . . . .	85
5.52	Gráficas simulación entorno experimental . . . . .	87
5.53	Flujo molar respecto del tiempo modelo. . . . .	88
5.54	Flujo volumétrico respecto del tiempo modelo. . . . .	89
5.55	Presión de operación respecto del tiempo. . . . .	90
5.56	Energía respecto el tiempo simulación. . . . .	91

5.57	Relación flujo presión apertura 40° simulación. . . . .	91
5.58	Relación flujo presión apertura de 50° simulación. . . . .	92
5.59	Relación flujo presión apertura de 90° simulación. . . . .	93
5.60	Relación flujo presión apertura de 180° simulación. . . . .	93

## Índice de tablas

1.1	Poder calorífico de combustibles ( <i>Molina et al., 2021</i> ) . . . . .	4
1.2	Constantes de calor específico ( <i>Pacheco et al., 2023</i> ) . . . . .	8
1.3	Síntesis de antecedentes detonaciones de hidrógeno . . . . .	14
1.4	Síntesis de antecedentes detonaciones de hidrógeno . . . . .	20
5.1	Componentes sistema de producción HHO . . . . .	44
5.2	Valores de volumen y error . . . . .	45
5.3	Estadísticos de regresión de presión de descarga . . . . .	48
5.4	Valores experimentales presión de descarga . . . . .	51
5.5	Estadísticos de regresión flujo volumétrico . . . . .	54
5.6	Valores experimentales flujo volumétrico . . . . .	57
5.7	Cantidad de masa de componentes de mezcla . . . . .	58
5.8	Descomposición en componentes flujo de gas . . . . .	58
5.9	Estadísticos de regresión velocidad de flujo . . . . .	60
5.10	Valores calculados de velocidad media de fluido compresible . . . . .	63
5.11	Estadísticos regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 40° . . . .	67
5.12	Estadísticos regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 50° . . . .	68
5.13	Estadísticos regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 90° . . . .	70
5.14	Estadísticos regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 180° . . . .	71
5.15	Análisis de proporción de mezcla jabón-agua-glicerina . . . . .	72

5.16	Reporte de análisis de muestras de jabonadura . . . . .	73
5.17	Tiempo y velocidad de flama (0.4 m) . . . . .	78
5.18	Tiempo y velocidad de flama (1.86 m) . . . . .	79
5.19	Condiciones iniciales y parámetros técnicos modelo simplificado de simulación	79
5.20	Comparación de valores flujo molar experimental y simulado . . . . .	88
5.21	Comparación de datos de presión experimental y simulada . . . . .	90
A.1	Presión absoluta promedio y desviación estándar . . . . .	97
A.2	Análisis ANOVA presión de descarga . . . . .	99
A.3	Presión absoluta promedio apertura de 40° y desviación estándar . . . . .	99
A.4	Presión absoluta promedio apertura de 50° y desviación estándar . . . . .	102
A.5	Flujo volumétrico promedio y desviación estándar . . . . .	104
A.6	Análisis ANOVA flujo volumétrico . . . . .	106
A.7	Flujo volumétrico promedio apertura de 40° y desviación estándar . . . . .	106
A.8	Flujo volumétrico promedio apertura de 50° y desviación estándar . . . . .	108
A.9	Cálculo de densidad de gas . . . . .	109
A.10	Velocidad de flujo promedio y desviación estándar . . . . .	111
A.11	Análisis de la varianza (ANOVA) regresión lineal . . . . .	113
A.12	Velocidad de flujo promedio y desviación estándar . . . . .	113
A.13	Velocidad de flujo promedio y desviación estándar . . . . .	114
A.14	Temperatura promedio y desviación estándar . . . . .	116
B.1	Presión absoluta promedio y desviación estándar . . . . .	119
B.2	Análisis ANOVA flujo-presión apertura 40° . . . . .	120
B.3	Presión absoluta promedio y desviación estándar . . . . .	121
B.4	Análisis ANOVA flujo-presión apertura 50° . . . . .	122
B.5	Presión absoluta promedio y desviación estándar . . . . .	122

B.6	Análisis ANOVA flujo-presión apertura $90^\circ$ . . . . .	123
B.7	Presión absoluta promedio y desviación estándar . . . . .	124
B.8	Análisis ANOVA flujo-presión apertura $180^\circ$ . . . . .	125
B.9	Intensidad acústica promedio y desviación estándar detonación $0.002 \text{ dm}^3$ . . .	125
B.10	Sobrepresión de detonación y desviación estándar detonación $0.002 \text{ dm}^3$ . . .	126
B.11	Intensidad acústica promedio y desviación estándar detonación $0.004 \text{ dm}^3$ . . .	126
B.12	Sobrepresión de detonación y desviación estándar detonación $0.004 \text{ dm}^3$ . . .	126
B.13	Presión durante <i>backfire</i> y desviación estándar . . . . .	127

## Resumen

El presente trabajo abordara la modelación física del entorno experimental de un sistema de producción prototipo de gas Hidrógeno-Oxígeno (o *HHO*) a proporción 2:1. La termodinámica del entorno, delimitado por un sistema cerrado que engloba la región de transporte del producto del sistema de reacción al quemador atmosférico. Esto con el fin de estudiar el comportamiento del gas producido como resultado de la composición, presión, temperatura y flujo del reactor hacia el quemador atmosférico.

También se considerará las posibles repercusiones en caso de tener una falla que derive en fuga y/o explosión dadas las características inherentes de la combustión de hidrógeno. Se propondrán pruebas experimentales de deflagración y detonación controladas lo que posiblemente formule un sistema de ecuaciones deterministas que permita estudiar a partir de los datos obtenidos un entorno mucho más seguro los parámetros o variables operativas de alto riesgo.

# Introducción

El hidrógeno se ha destacado como una fuente de energía prometedora debido a su potencial para reducir las emisiones de carbono, así como a su alta eficiencia energética comparado con otros combustibles. Capaz de suministrar una energía de  $120 \frac{MJ}{kg}$  al momento de su combustión en comparación de la gasolina que libera  $34.8 \frac{MJ}{kg}$ .

Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos significativos dadas las características inherentes del gas. Siendo este el gas más ligero teniendo solo el 6.96 % de la densidad del aire, teniendo la capacidad de fugarse fácilmente incluso de tanques considerados herméticos. Además de necesitar poca energía para su combustión en comparación con otros combustibles, siendo aproximadamente  $0.019 mJ$  mientras que para el metano se necesitan  $0.28 mJ$ .

En este contexto, la modelación y simulación matemática del entorno experimental de un sistema de generación y combustión de hidrógeno emerge como una herramienta esencial para poder llevar, por una parte, pruebas en condiciones operativas poco seguras experimentalmente.

Y por el otro lado, establecer límites de trabajo seguro como función de las cantidades de gas conducidas en líneas de proceso a partir de la composición del gas, temperatura, presión, flujo y velocidad de flujo.

Además, se considera la posibilidad de aplicarse a temas como la optimización del proceso o el diseño de sistemas innovadores de preservación de la seguridad operativa de este tipo de procesos de generación y combustión de la mezcla de gas Hidrógeno-Oxígeno.

## Marco teórico

### Sección 1.1.

#### *Características del gas hidrógeno y métodos de producción*

Una de las principales problemáticas actualmente es la crisis ambiental generada por el aumento de los gases de efecto invernadero debido a las actividades humanas, en particular la producción de energía eléctrica, realizada tradicionalmente con la quema del petróleo y sus derivados, que genera tres cuartas partes de las emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (*Organización Mundial de la Salud, 2022*)

Para tratar de reducir las emisiones de  $CO_2$  se han estudiado e implementado muchas propuestas de producción de energía eléctrica que sean más ecológicas y sustentables, algunas de ellas son:

- a. La energía eólica; aprovecha la fuerza del viento para generar trabajo por medio de la energía cinética rotacional de las aspas que, a través de aerogeneradores almacena la energía.
- b. La energía nuclear; utiliza la fisión nuclear de elementos pesados como uranio-235 o plutonio-239, que al separar los núcleos de estos libera energía.
- c. La energía solar; aprovecha la incidencia de la radiación electromagnética emitida por el Sol en celdas fotovoltaicas, que, por efecto fotovoltaico, genera energía eléctrica.
- d. Aunado a estas, otra propuesta a considerar como combustible sustentable es el uso de gas hidrógeno ( $H_2$ ).

Este gas tiene la particularidad de tener una densidad bastante baja dado que el hidrógeno por sí mismo es uno de los elementos más ligeros con menor peso atómico. Su densidad en condiciones estándar en estado gaseoso es tan solo el 6.96 % de la densidad del aire ( $\rho_{aire} = 1.275 \frac{kg}{m^3}$ ). Mientras que en estado líquido es del 7.08 % la densidad del agua (*Molina et al., 2021*).

Este se encuentra en estado líquido a temperaturas menores de  $-259.15 \text{ }^\circ C$  y en estado

sólido a temperaturas menores de  $-253.15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Molina et al., 2021). El punto crítico del hidrógeno es a una presión de  $13.57\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  y  $-239.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Dentro de las características que lo catalogan como una propuesta a considerar es la cantidad de energía que libera por unidad de masa, o poder calorífico, teniendo casi tres veces más poder calorífico que otros combustibles comunes. Para tener una mejor visualización de esta propiedad, la Tabla 1.1 muestra los valores de poder calorífico del gas hidrógeno y combustibles comunes (Molina et al., 2021):

Tabla 1.1: Poder calorífico de combustibles (Molina et al., 2021)

Combustible	PCS ( $\frac{MJ}{kg}$ )	PCI ( $\frac{MJ}{kg}$ )
Hidrógeno	141.86	119.93
Metano	55.53	50.02
Propano	50.36	45.6
Gasolina	47.5	44.5
Diésel	44.8	42.5
Metanol	19.96	18.05

Donde la cantidad de calor utilizable viene dado por el valor del poder calorífico inferior (PCI), mientras que todo el calor que libera durante el proceso de combustión es el valor del poder calorífico superior (PCS).

Así mismo, otra de las ventajas que este gas presenta respecto de los combustibles comunes como el metano y la gasolina son los productos de su combustión. Al combustionar el gas hidrógeno este no genera gases de efecto invernadero tan nocivos como lo son el  $CO$  y el  $CO_2$ , sino vapor de agua.

Sin embargo, la presencia de hidrógeno en la atmósfera terrestre es escasa dada su alta difusividad, pero su presencia en la corteza terrestre es bastante abundante. El hidrógeno no es un recurso natural como el petróleo o una fuente de energía primaria como el Sol, generalmente se encuentra formando compuestos con carbono, oxígeno u ambos, como lo es el agua y los hidrocarburos (metano y propano por mencionar algunos) o con otros elementos (Molina et al., 2021).

Para poder obtener el gas hidrógeno es necesario separarlo de los compuestos que se encuentra generando. Para ello, existen diversos métodos de producción basados en diferentes combinaciones de procesos y operaciones unitarias (Valencia, 2013):

- a. Reformado de vapor: sirve para separar el hidrógeno de los hidrocarburos o alcoholes que utilizan como materia prima. Este método es uno de los más utilizados, económicos y eficientes, dado que utiliza la tecnología ya existente del tratamiento de hidrocarburos. En este se pone en contacto el hidrocarburo con vapor de agua a altas temperaturas para realizar la separación. Sin embargo, genera considerables emisiones de  $CO_2$ .
- b. Oxidación parcial: el segundo método más utilizado en el cual se hace reaccionar un

hidrocarburo con una cantidad de oxígeno en menor proporción a la estequiométrica. Sin embargo, también emite grandes cantidades de dióxido y monóxido de carbono.

- c. Reformado auto catalítico: es la combinación del reformado de vapor de agua y la oxidación parcial, que al igual que los dos anteriores genera considerables emisiones de monóxido y dióxido de carbono.
- d. Gasificación: se utiliza como materia prima combustible fósil o biomasa, en la cual la producción de hidrógeno está relacionada con la relación agua/hidrógeno en la alimentación.
- e. Fotólisis: la luz actúa como catalizador en el proceso de descomposición de agua o biomasa, la mayor desventaja es la condición de la tecnología.
- f. Biofotólisis: utiliza microorganismos como algas verdes o cianobacterias que se someten a una determinada longitud de onda para que, con sus procesos metabólicos se obtenga el hidrógeno. Una de las mayores desventajas es que las enzimas productoras de hidrógeno son muy sensibles a la concentración de oxígeno, además de ser una tecnología todavía en estudio.
- g. Termólisis: es la disociación de la molécula del agua mediante el suministro de energía en forma de calor. La temperatura del proceso es de aproximadamente.  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- h. Electrólisis: es la separación de la molécula del agua por medio de electricidad, se puede utilizar agua o biomasa como materia prima, la electrólisis comercial utiliza agua.

Para propósitos de este trabajo y debido a que su tecnología está más desarrollada y estudiada (*Clemente et al., 2018*), resulta necesario estudiar y comprender el proceso de la electrólisis del agua, así como la dependencia del proceso a determinadas variables de operación como temperatura, presión y flujo de gas que se obtiene como producto.

---

## Sección 1.2.

---

### *Electrólisis del agua*

---

La electrólisis del agua consiste en provocar una reacción de oxido-reducción mediante la aplicación de una corriente eléctrica continua tal que, suministre la energía necesaria para que ocurra la separación de la molécula en sus componentes; hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ).

Este proceso puede hacerse con agua en estado líquido o con vapor de agua, sin embargo, la electrólisis con vapor de agua conlleva más complicaciones, por lo que el proceso más utilizado es con agua líquida (*Mortimer, 2008*).

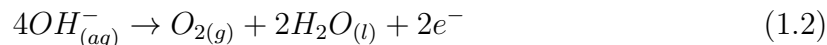
El proceso de electrólisis requiere de una celda formada por dos componentes:

- Cátodo: donde se lleva a cabo la reacción de reducción, es decir la ganancia de electrones (*Chang, 2010*), siendo en este electrodo donde se produce el hidrógeno. La reacción se

describe en la ecuación (1.1):



- **Ánodo:** donde se lleva a cabo la reacción de oxidación, es decir la pérdida de electrones (*Chang, 2010*), siendo en este electrodo donde se produce el oxígeno. La reacción se describe en la ecuación (1.2):



La reacción que describe el comportamiento del estado estable del agua (2 moles) se describe en la ecuación (1.3):



El proceso de electrólisis puede realizarse en dos medios con diferentes pH; en medio ácido o alcalino. La diferencia entre cada uno de los métodos no radica tanto en el electrolito, dado que el proceso es independiente del *pH* (*Millet*). Si no, que radica en la estabilidad del material con el que esté construido el electrodo.

Para el proceso alcalino se utiliza como electrolito, generalmente, hidróxido de potasio (*KOH*) o hidróxido de sodio (*NaOH*).

Así mismo, la electrólisis también se puede realizar mediante el proceso de Membrana de Intercambio de Protones o PEM por sus siglas en inglés (*Proton Exchange Membrane*). Esta técnica presenta una ventaja respecto de la electrólisis alcalina, pues esta puede operar con una mayor densidad de corriente, alrededor de  $1 - 2 \frac{A}{cm^2}$  y la pureza del hidrógeno es mayor. Sin embargo, su mayor inconveniente es el costo de los componentes del sistema de producción, la cual no la vuelve una opción económicamente viable.

Por otro lado, el proceso de electrólisis puede operar a bajas o altas temperaturas, siendo la tecnología de altas temperaturas la que menor consumo energético requiere, pero cuya tecnología es la menos desarrollada. Para llevar a cabo la electrólisis de altas temperaturas es necesario realizar una presurización para negar el efecto de cambio de fase del agua.

La tecnología de bajas temperaturas utiliza agua en estado líquido, lo que facilita la producción con equipo más económica, pero con alto consumo energético (*Millet*). Continuando con esto último, en condiciones estándar ( $P = 1.033 \frac{kg}{cm^2}$ ,  $T = 25^\circ C$ ), el agua es líquida y tanto hidrógeno y oxígeno se encuentran en fase gas, por lo que, para la reacción de un mol de agua (ecuación (1.4) (*Pacheco et al., 2023*)):



Los valores del cambio en la entalpía (ecuación (1.5)), la entropía (ecuación (1.6)) y la energía libre de Gibbs ( ecuación (1.7)) para generar la reacción de la ecuación (1.4) viene a

ser (*Millet*):

$$\Delta H_d^0(H_2O_{(l)}) = 285.4 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (1.5)$$

$$\Delta S_d^0(H_2O_{(l)}) = 163.15 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (1.6)$$

$$\Delta G_d^0(H_2O_{(l)}) = \Delta H_d^0(H_2O_{(l)}) - T\Delta S_d^0(H_2O_{(l)}) = 237.22 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (1.7)$$

Dado que el cambio de la energía libre de Gibbs expresada en la ecuación (1.7)) es positivo, el proceso es endotérmico, lo que hace que la reacción de electrólisis sea no espontánea.

El significado físico de cada uno de los cambios de energía es una forma en que la energía interactúa en el sistema.

El cambio en la entalpía expresada en la ecuación (1.5) es la energía total que requiere el sistema, esta se descompone en dos:

- La energía en forma de calor representada por el cambio de la entropía (ecuación (1.6)).
- La energía en forma de electricidad representada por el cambio en la energía libre de Gibbs (ecuación (1.7))

Los cambios de entalpía, energía libre de Gibbs y entropía son funciones de estado, es decir, dependen de parámetros termodinámicos; presión y temperatura.

Si se considera una presión constante de una atmósfera, por Primera Ley de la Termodinámica, el cálculo de los cambios energéticos se expresa por las ecuaciones (1.8), (1.9) y (1.10) (*Pacheco et al., 2023*):

$$\Delta H_i(T, 1) = H_i^0 + a\Delta T_1 \frac{b}{2} 10^{-3} \Delta T_2 - c\Delta T_3 - \frac{e}{2} 10^{-8} \Delta T_4 \quad (1.8)$$

$$\Delta S_i(T, 1) = S_i^0 a \Delta T_6 + b 10^{-3} \Delta T_1 - \frac{c}{2} 10^8 \Delta T_5 \quad (1.9)$$

$$\Delta G_i(T, 1) = \Delta H_i(T, 1) - T\Delta S_i(T, 1) \quad (1.10)$$

Donde:

$$\Delta T_1 = T - T_0 \quad (1.11)$$

$$\Delta T_2 = T^2 - T_0^2 \quad (1.12)$$

$$\Delta T_3 = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \quad (1.13)$$

$$\Delta T_4 = \frac{1}{T^2} - \frac{1}{T_0^2} \quad (1.14)$$

$$\Delta T_5 = \frac{1}{T^3} - \frac{1}{T_0^3} \quad (1.15)$$

$$\Delta T_6 = \ln |T| - \ln |T_0| \quad (1.16)$$

Y donde las constantes  $a, b, c, e$  son los valores de los coeficientes de las ecuaciones de calor específico, cuyo valor depende de cada sustancia. Dichos valores se presentan a continuación en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2: Constantes de calor específico (*Pacheco et al., 2023*)

Componente	a	b	c	e
Agua	72.39	9.38	–	–
Hidrógeno	26.57	3.77	1.17	–
Oxígeno	34.35	1.92	–18.45	4.06

Cuyo comportamiento se muestra gráficamente en la Figura 1.1:

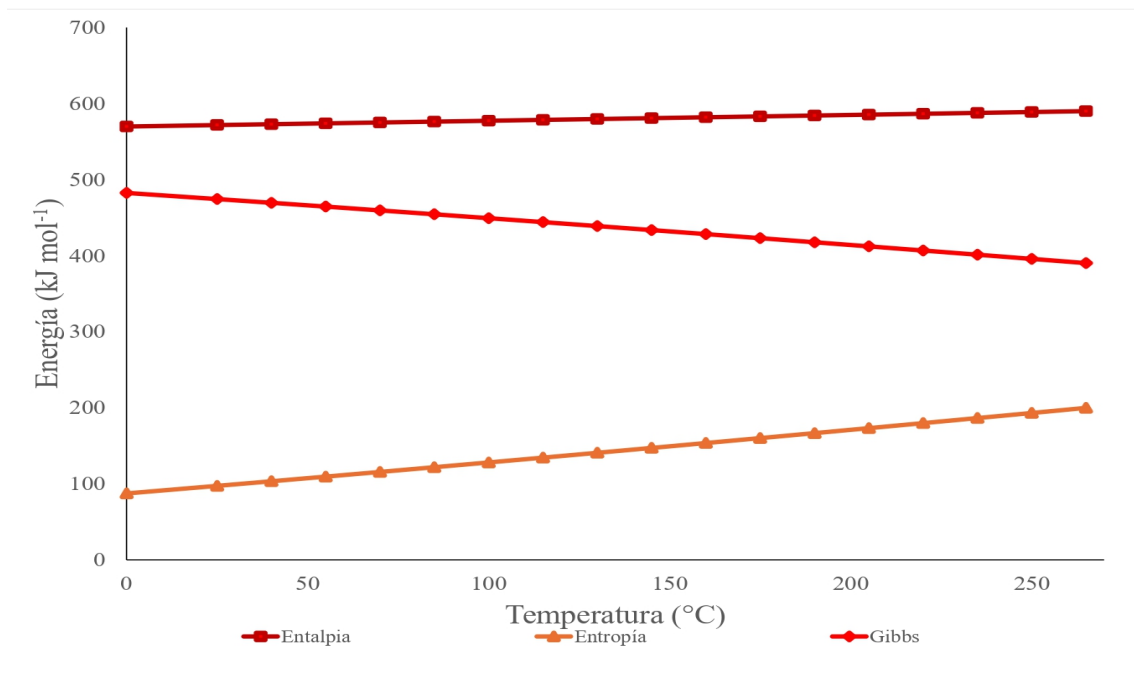


Figura 1.1: Cantidad de energía para electrólisis  
Elaboración propia

Se observa que conforme la temperatura va en aumento, la contribución de la energía en forma de calor también se comporta de la misma manera. En caso contrario a la contribución eléctrica cuyo comportamiento es decreciente. En otras palabras, el consumo de energía eléctrica que requiere el proceso es menor y la electrólisis comienza a tomar energía en forma de calor, por lo que a temperaturas altas el proceso, energéticamente, es más eficiente (*Millet*).

Considerando que la contribución de la energía eléctrica es descrita por la energía libre de Gibbs, el cambio de esta representa, en términos eléctricos, a la diferencia de potencial de carga eléctrica o voltaje como comúnmente se le conoce (*Wangness, 2001*). Por lo que al voltaje puede ser una función de la energía libre de Gibbs como se observa en la ecuación (1.17):

$$v \propto \Delta G \quad (1.17)$$

Así mismo, el voltaje también puede ser función de la entalpía, es decir, relacionarse con la energía total suministrada (ecuación (1.18)):

$$v \propto \Delta H \quad (1.18)$$

Por lo que es posible obtener valores de voltaje que involucren a las funciones de estado, esta relación se muestra en las ecuaciones (1.19) y (1.20) (*Millet*):

$$v_G(T, P) = \frac{\Delta G(T, P)}{n_e F} \quad (1.19)$$

$$v_H(T, P) = \frac{\Delta H(T, P)}{n_e F} \quad (1.20)$$

Donde:

- $n_e$ : es el número de electrones transferidos. Para el caso de la reacción de dos moles de agua presentada en la ecuación (1.3) su valor es 4.
- $F$ : es una constante conocida como *constante de Faraday*. Cuyo valor se reporta en la ecuación (1.21)

$$F = 96,485 \frac{C}{mol} \quad (1.21)$$

Dado que se ha definido al voltaje como una función dependiente de variables de estado (presión y temperatura). El comportamiento del voltaje respecto de la temperatura se muestra en la Figura 1.2

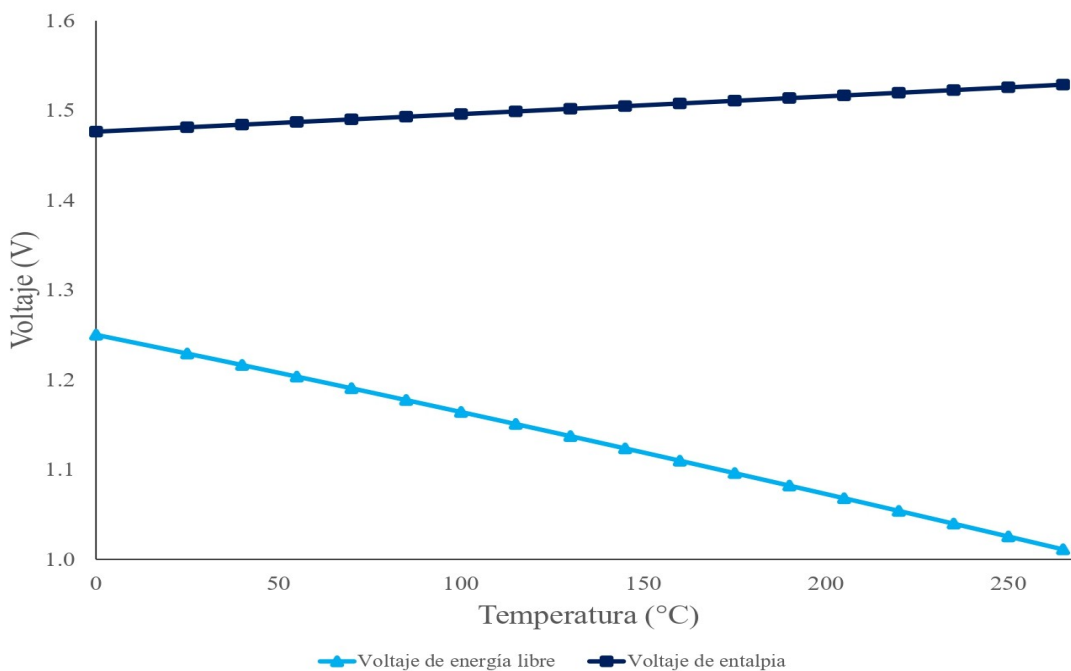


Figura 1.2: Voltaje vs temperatura  
Elaboración propia

Se observa que cuando la temperatura aumenta el voltaje definido por entalpía aumenta, mientras que el voltaje definido por energía libre de Gibbs disminuye, al igual que en la gráfica de la Figura 1.1

Para la otra variable de estado, es decir la presión, su comportamiento se reporta en la Figura 1.3:

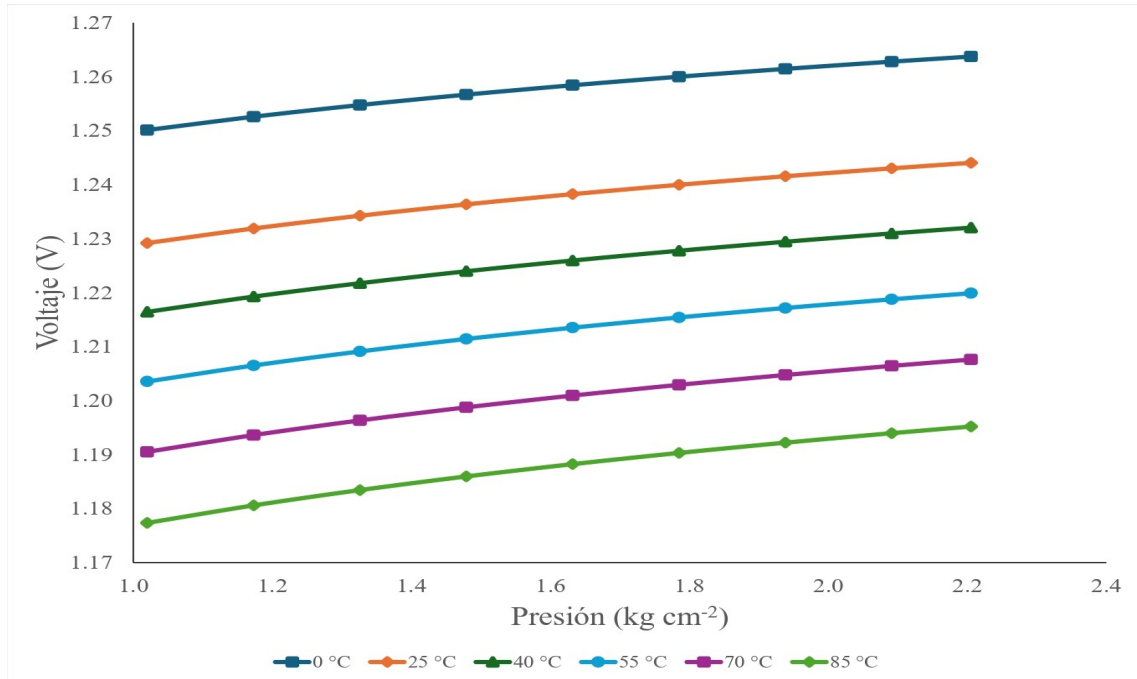


Figura 1.3: Voltaje vs presión  
Elaboración propia

Para el caso de la presión, la variación es mínima y podría considerarse despreciable, por lo que la principal variable que influye para el voltaje de electrólisis es la temperatura de la celda.

Adicional al voltaje, la resistencia de la celda electrolítica es una función de la temperatura e influye en el buen funcionamiento del proceso de electrólisis.

La dependencia de la resistencia con la temperatura depende del tipo de material con la que la celda es fabricada debido a la resistividad del material definida por la ecuación (1.22):

$$\rho_r = \frac{\vec{E}}{\vec{J}} \quad (1.22)$$

Donde  $\vec{E}$  es el campo eléctrico que se debe aplicar al material para hacer fluir una densidad de corriente  $\vec{J}$  (Sears et al., 2009). Para evitar las complicaciones del cálculo con elementos vectoriales también se puede definir por la ecuación (1.23):

$$\rho_r = \frac{vL}{aI} \quad (1.23)$$

Donde  $v$  e  $I$  son el voltaje y la corriente respectivamente,  $L$  es la longitud del conductor y  $a$  el área de sección transversal por la cual se aplica el voltaje.

El flujo de electrones que pasa por un cable conductor es análogo al flujo de un fluido por una tubería, donde la viscosidad de flujo depende de las características del tubo; como su diámetro y el área de sección transversal (*Halliday et al., 2009*).

Los iones de un conductor metálico aumentan la amplitud de su vibración conforme existe un aumento en la temperatura, haciendo que haya un flujo de electrones (corriente) y estos choquen con algunos de los iones del conductor dificultando su paso y aumentando su resistividad, matemáticamente se expresa en la ecuación (1.24) (*Sears et al., 2009*):

$$\rho_r(T) = \rho_{r0}[1 + \alpha_r(T - T_0)] \quad (1.24)$$

Donde  $\rho_{r0}$  es la resistividad a una temperatura de referencia  $T_0$ , normalmente tomada a  $0^\circ\text{C}$  o  $25^\circ\text{C}$ . Y  $\alpha_r$  es una constante que depende del tipo de material llamado coeficiente de temperatura de la resistividad (*Sears et al., 2009*).

La ecuación (1.23) tiene un término especial de voltaje dividido entre corriente, la cual se conoce como *Ley de Ohm*, la cual establece una relación de proporcionalidad entre la cantidad de electrones fluctuantes en un circuito y la resistencia de este, matemáticamente se expresa en la ecuación (1.25) (*Halliday et al., 2009*)

$$r = \frac{v}{I} \quad (1.25)$$

La cual si se sustituye en la ecuación (1.23), se obtiene una relación entre la resistividad y la resistencia, reportada en la ecuación (1.26):

$$r = \rho_r \frac{a}{L} \quad (1.26)$$

Donde también la resistencia depende de la geometría del conductor.

Si se sustituye la ecuación (1.26) en la ecuación (1.24) se pueden cancelar los términos geométricos del material conductor dado que son constantes y queda una relación explícita entre la resistencia y la temperatura (ecuación (1.27)):

$$r(T) = r_0[1 + \alpha_r(T - T_0)] \quad (1.27)$$

Una vez obtenidos los datos de energía con las ecuaciones (1.17) y (1.20) y con la información de la resistencia del material calculada con la ecuación (1.27) se puede obtener la cantidad de flujo de energía, es decir, la corriente, mediante la Ley de Ohm (ecuación (1.25)).

Por otra parte, si se conoce la cantidad de moles producidos en el proceso de electrólisis se es posible determinar la cantidad de energía suministrada mediante la *Ley de Faraday de electrólisis*, la cual establece una relación de proporcionalidad directa entre cantidad de moles producida por el proceso y la cantidad suministrada (ecuación (1.28)):

$$n = \frac{Q}{z_e F} \quad (1.28)$$

Donde  $z_e$  es la valencia del elemento producido (o electrones transferidos en el proceso).

Dado que en la práctica es más fácil conocer y manipular la cantidad de electricidad suministrada por medio de la corriente, si se toma la definición de corriente (ecuación (1.29) (Ida, 2015)):

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.29)$$

Donde:

$$\Delta Q = Q - Q_0 \quad (1.30)$$

$$\Delta t = t - t_0 \quad (1.31)$$

Si se toma un tiempo inicial  $t_0 = 0$  y el hecho de que al inicio del proceso no hay carga suministrada  $Q_0 = 0$ , entonces la definición de la ecuación (1.29) se puede simplificar (ecuación (1.32)):

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.32)$$

Despejando para la carga y sustituyendo en la ecuación (1.28), se obtiene la ecuación (1.33):

$$n = \frac{It}{z_e F} \quad (1.33)$$

Al despejar el tiempo se obtiene la cantidad de moles producidos por unidad de tiempo, es decir, el caudal molar, que si se toma suposiciones similares que la ecuación (1.32), la ecuación (1.33) se puede expresar como la expresión (1.34):

$$\dot{n} = \frac{I}{z_e F} \quad (1.34)$$

Con la combinación de la Ley de Ohm (ecuación (1.25)) y la Ley de Faraday (ecuación (1.34)) se puede determinar el valor numérico de las principales variables eléctricas (voltaje, corriente y resistencia) que se requiere una celda electrolítica, así como la cantidad de gas hidrógeno que se produce el sistema.

---

### Sección 1.3.

---

#### *Modelación de sistemas de producción electrolítica*

---

Durante la búsqueda bibliográfica para este trabajo se encontraron dos vertientes diferentes a la modelación matemática.

El primer enfoque hace referencia a la modulación y optimización del proceso de electrólisis, es decir, la relación de mayor producción cuyas variables de respuesta son la presión y flujo del

gas con un menor consumo energético visualizada en la manipulación de variables eléctricas como voltaje y corriente, así como la búsqueda de una mayor eficiencia del equipo.

Siguiendo la misma línea, también se estudia la relación que existe entre una mayor concentración de electrolito y la cantidad y pureza del gas producido, así como la búsqueda de mejores materiales para la construcción de los electrodos de las placas electrolíticas.

A manera de ejemplificar estos enfoques a continuación se realiza una breve explicación de los trabajos considerados más importantes:

1. (*Babay et al., 2023*):

Presenta un modelo para celdas electrolizadoras alcalinas el cual enfoca la evolución de las reacciones, la disolución de gases en el electrolito, la formación de burbujas, así como comparar el impacto de la variación de la concentración de electrolito ( $KOH$ ), la porosidad del separador y la tasa de flujo de las burbujas de gas en el electrolito.

En dicho estudio se muestra que la generación de burbujas y el flujo de ambas fases (líquido-gas) generan un incremento en los sobrepotenciales, además de mostrar que la fracción volumétrica del hidrógeno es mayor a la fracción volumétrica del oxígeno. Finalmente, se mostró que existe una mayor acumulación de burbujas en el electrodo negativo. Se concluye en la necesidad de estudiar mejor como es que la administración de corriente afecta a la geometría de las burbujas de gas y encontrar otros factores que afecten en la producción del gas.

2. (*Matheus et al., 2023*):

Se presenta un modelo de operación de celdas electrolíticas alcalinas en estado transitorio resuelto por colocación ortogonal con el objetivo de definir el conjunto de parámetros operativos que minimicen los costos del proceso considerando un sistema dinámico del proceso. Además, se considera la acumulación de materia y energía en tres principales procesos de la unidad electrolítica alcalina.

Se mostró que la acumulación de la energía tiene un mayor impacto en la operación que la acumulación de masa, así mismo se muestra una fuerte relación entre la electricidad implementada al sistema y la temperatura de la celda.

Se concluye en la necesidad de implementación de algunos parámetros técnicos del equipo para poder dar mayor robustez al modelo, además de reducir las simplificaciones para aproximarse a un proceso en operación real.

3. (*Niroula et al., 2023*):

Se propone un modelo que integra fundamentos termodinámicos y electroquímicos creado y solucionado por medio de la herramienta MATLAB/ SIMULINK que analiza el voltaje contra la densidad de corriente suministrada al electrolizador, con el cual se pretende optimizar la operatividad con la variación de parámetros como; presión y temperatura por mencionar algunos. Además de comparar su funcionamiento con diferentes concentraciones de electrolito.

Se observó que el incremento de la temperatura de operación y una reducción en la presión de operación favorecen a la optimización del proceso al disminuir el voltaje de

la celda, además, la utilización de una solución electrolítica de al 30 % de  $KOH$  es más optima que una solución al 20 % y al 40 %

Se concluye con la implementación del mismo modelo para ahora estudiar el flujo de gas en el electrolizador en un trabajo posterior.

4. (*Pacheco et al., 2023*):

Se propone un modelo el cual considera la termodinámica de la disociación del agua, así como la cinética de los electrodos y la resistencia óhmica de las celdas para un electrolizador monopolar alcalino. Además, se incluyen las variables como; voltaje, corriente y producción de gas.

Se generan curvas características con el objetivo de obtener la corriente y número de placas que sean mejor para el proceso, además, simular el flujo de gas combustible generado por diferentes magnitudes de corriente. En dicho trabajo se redujeron los parámetros a solo tres; termodinámicos, cinéticos y eléctricos comparado con demás trabajos en los cuales se implementan de seis a siete parámetros, el cual predice de manera acertada el proceso de electrólisis del sistema.

5. (*Rivera et al., 2021*):

Se presenta un modelo basado en dinámica de fluidos computacional en el cual se estudia el acomodo de las celdas electrolizadoras, la optimización del flujo de combustible y la implementación de distribuidores de líquido dentro de las celdas.

Se encontró que el modelo es capaz de dar la óptima geometría de las placas, así como el acomodo de estas, sin embargo, no ofrece un buen desempeño al momento de aplicarlo para simular el comportamiento del transporte de masa, la dispersión del fluido y la distribución de la corriente en los poros de los electrodos.

La Tabla 1.3 muestra un resumen de las fuentes ya mencionadas con anterioridad.

Tabla 1.3: Síntesis de antecedentes detonaciones de hidrógeno

Autor y año	Propuesta	Resultados	Conclusiones
<i>Babay et al., 2023</i>	Modelo para celdas electrolizadoras, que abarca la evolución de gases de reacción, disolución de gases en electrolito, formaciones de burbuja y cambio en el transporte	La velocidad de flujo es afectada por la concentración del electrolito, la porosidad de la celda la temperatura y el voltaje de la celda.	La fracción volumétrica del hidrógeno es mayor a la del oxígeno. Existen bloqueos de burbujas mayoritariamente en el electrodo negativo.

Continua Tabla 1.3			
Autor y año	Propuesta	Resultados	Conclusiones
<i>Matheus et al., 2023</i>	Modelo de estado transitorio resuelto por colocación ortogonal para determinar el conjunto de parámetros operativos que minimice los costos.	El voltaje es directamente proporcional a la temperatura. El flujo volumétrico es proporcional a la corriente.	El modelo necesita especificaciones técnicas del equipo. El consumo eléctrico está estrictamente ligado con la temperatura.
<i>Niroula et al., 2023</i>	Modelo basado en diferentes ecuaciones termodinámicas y electroquímicas.	Generación de curvas de polarización. A determinados valores de presión, temperatura y concentración el modelo es constante. Cuanto mayor sea la temperatura las variables termoelectricas disminuyen.	El aumento de la temperatura de operación y decremento de presión de operación generan una disminución de voltaje.
<i>Pacheco et al., 2023</i>	Modelo matemático que evalúa los potenciales que afectan el voltaje de la celda. Incluye la termodinámica de la disociación, la cinética y la resistencia de los iones	Reducción de los componentes del sistema en comparación con otros trabajos. Placas cargadas funcionan mejor y producen más gas.	La información experimental vuelve al modelo más preciso. El modelo se ajusta a un reactor en particular.
<i>Rivera et al., 2021</i>	Modelo matemático basado en la dinámica de fluidos dentro de las celdas del sistema de producción. Estudio de la transferencia de masa y la caída de presión.	Descripción del flujo de gas como función de la corriente eléctrica de alimentación, así como de la geometría en la que este viaje.	La simulación ayuda para determinar los valores de diseño como el tamaño de placas, así como la hidrodinámica y el transporte de masa.

Una vez producido el gas, modelado y optimizado el proceso, surge la necesidad de almacenarlo y/o transportarlo para su subsiguiente implementación, ya sea doméstica o comercial. Sin embargo, debido a las características inherentes del gas hidrógeno, el proceso de almacenamiento conlleva muchos desafíos, como lo son la construcción de tuberías y tanques apropiados, además, desafíos de seguridad para los operadores que manipulen el gas desde su producción.

## Sección 1.4.

---

### *Problemas de almacenamiento de hidrógeno*

---

Las moléculas del hidrógeno gaseoso son más pequeñas que las de los demás gases, esto hace que su almacenamiento sea un gran desafío. Dada su alta volatibilidad el gas puede llegar a fugarse con cualquier diminuta fisura en los tanques de almacenamiento y/o en las tuberías donde se transporta, incluso si estos se construyen con materiales que puedan llegar a ser herméticos o impermeables para otros gases (*Molina et al., 2021*).

Una propuesta para mantenerlo almacenado es estado líquido, ya sea produciendo directamente el hidrógeno líquido o producirlo gaseoso y después mediante un proceso de licuefacción, almacenarlo en estado líquido. Sin embargo, producir hidrógeno líquido es un proceso bastante complicado y caro, debido al gran consumo de energía que se requiere, así mismo, el almacenamiento de hidrógeno líquido también es un proceso costoso.

El presurizado es el método más común y desarrollado en la actualidad, sin embargo, el presurizar hidrógeno genera un aumento del consumo energético dependiente de la presión final que se quiera alcanzar.

Los equipos de almacenamiento final para el hidrógeno presurizado son bastante pesados y estorbosos, en comparación con el almacenamiento de gasolina, es 10 veces más pesado y 15 veces más voluminoso. Aunado a eso, en estado líquido el hidrógeno es muy volátil y tiende a evaporarse rápidamente, dado su bajo valor de punto de ebullición del hidrógeno y su baja densidad.

En el caso de que se encuentre una fuga al aire libre, el pequeño tamaño de la molécula del gas hidrógeno le da una gran flotabilidad y difusividad, por lo que es rápido que no se formen concentraciones del gas, reduciendo un poco las concentraciones que pueden derivar en un incendio.

Sin embargo, en espacios cerrados y poco ventilados, su difusividad puede ocasionar que se concentre el suficiente volumen que concluya en un incidente catastrófico.

Una medida para cuantificar esto es el porcentaje volumétrico del rango de flamabilidad, es decir, la concentración volumétrica mínima y máxima de la mezcla aire-combustible en la que, si se introduce una fuente de ignición, pueda ocurrir una combustión (*Turno, 1999*).

El rango de inflamabilidad es un intervalo bastante grande comparado con el de otros combustibles, por ejemplo; el metano tiene un rango de flamabilidad definido en el intervalo de mezcla aire combustible del 4.3 – 15%, mientras que para el hidrógeno está entre el 4 – 75%.

Si además de tener la concentración necesaria se añade que, el hidrógeno tiene la característica de tener energía de ignición bastante baja y un rango de velocidad de combustión más alto comparado también con el metano, siendo este valor de  $0.019 \text{ mJ}$  y combustionando entre los  $2.65 - 3.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , mientras que el metano necesita para combustionar  $0.28 \text{ mJ}$  y lo hace entre los  $0.37 - 0.45 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (*Yang et al., 2024*).

Teniendo presente la información de la energía que necesita y la energía liberada que puede producir una combustión violenta de gas hidrógeno, resulta importante conocer los detalles de los fenómenos consecuentes de esta misma.

---

## Sección 1.5.

---

### *Deflagraciones y detonaciones*

---

Un tema importante de la teoría de combustiones son los conceptos de detonación y deflagración. Dado que adicionalmente a todo lo discutido en secciones anteriores el gas hidrógeno puede transitar de deflagración a detonación de manera bastante rápida.

La combustión de procesos en gases reactivos involucra no solo la reacción, sino varios fenómenos de transporte.

Cuando se genera una combustión en la cual los fenómenos de difusión y conducción del calor predominan sobre la convección se genera un frente de onda o subsónico conocido como deflagración (*Goldin et al., 2024*).

Para el caso particular del hidrógeno, los estudios realizados en su deflagración se realizan con experimentos en sistemas cerrados, como contenedores cilíndricos o esféricos y tuberías largas, dado que muchos de los accidentes que se han reportado han sido en sistemas de almacenamiento (*Yang et al., 2024*).

Por otro lado, cuando el fenómeno de transporte predominante en la combustión es la convección del calor sobre la difusión o conducción, el frente de onda que se obtiene como consecuencia tiene una velocidad ultrasónica, es decir, mayor a  $343 \frac{m}{s}$  (en aire a  $T = 20^\circ C$  (*Halliday et al., 2009*)) entonces la combustión espontánea recibe el nombre de detonación.

Las detonaciones tienen la característica de formar ondas de choque discontinuas seguidas de una zona de reacción, en donde la liberación de calor se lleva a cabo (*Goldin et al., 2024*).

Las detonaciones pueden iniciar de dos maneras, la forma lenta y la forma rápida. Para el caso de una ignición lenta, la fuente que lo provoca no tiene una importante relevancia en él, sino cómo el proceso se lleva a cabo. La transición de deflagración a detonación o *DDT* por sus siglas en inglés (*deflagration-to-detonation*) se considera una detonación lenta.

La transición de deflagración a detonación puede dividirse en dos fases independientes;

- En la primera se relaciona factores como la aceleración de la flama, generaciones de vórtices, formaciones de chorro y mezcla de productos y reactantes.
- En la segunda fase, se forma la onda de detonación (*Yang et al., 2024*).

El análisis del *DDT* es un fenómeno bastante complejo dadas las interacciones no lineales a lo largo de diferentes procesos multiescalar en un flujo con estructuras espacio-temporales

bastante complicadas. Por lo cual se utilizan propuestas de ecuaciones de multidimensionales reactivas de Navier-Stokes y algoritmos numéricos bastante complejos, pero se pueden hacer suposiciones que reduzcan la complejidad de las ecuaciones, dejándolas como unidimensionales y para el tratamiento de un gas ideal (ecuaciones (1.35), (1.36), (1.37) y (1.38)) (*Goldin et al., 2024*):

$$\rho_t + u\rho_x + \rho u_x = 0 \quad (1.35)$$

$$\rho(u_t + \nu u_x) + \frac{P_x}{\gamma} = \frac{4}{3}\delta \text{Pr}[U_{xx}] \quad (1.36)$$

$$\rho(T_t + uT_x) - \frac{\gamma - 1}{\gamma}(P_t + uP_x) = \delta T_{xx} + Q\omega + \frac{4}{3}\text{Pr}[(\gamma - 1)^2]u_x^2 \quad (1.37)$$

$$\rho(\lambda_t + u\lambda_x - x) = \rho\omega + \frac{\delta}{Le}(\rho\lambda_x)_x \quad (1.38)$$

Las cuales describen satisfactoriamente la transición en los fenómenos de transporte y predice las ondas viajeras en el fenómeno de *DDT* (*Goldin et al., 2024*).

Por otro lado, la detonación por ignición rápida o también nombrada de ignición directa, la energía externa suministrada es importante debido a que la onda expansiva comprime significativamente al combustible en cuestión, la cual desarrolla rápida y considerablemente la detonación (*Xu & Zhang, 2024*).

Teniendo en cuenta que se necesita muy poca energía para liberar un aproximado de  $0.12 \frac{MJ}{kg}$ . Surge la necesidad de determinar las cantidades de gas hidrógeno que resulta seguro producir, además de las condiciones de composición, presión, temperatura y flujos máximos en los sistemas de transporte, almacenamiento y producción a nivel laboratorio como inicio para evitar las combustiones que deriven en un incendio, una detonación o una deflagración y concluyan en incidentes como en Corea del Sur en 2019, donde el saldo fue de seis personas lesionadas y dos fallecidos por mencionar un ejemplo (*Yang et al., 2024*).

Por lo que para propósitos de este trabajo es necesario el estudio termodinámico, físico y químico que contribuyan a combustiones y sus consecuencias dadas las condiciones operativas a las que se encuentre el gas hidrógeno y la cantidad de este.

---

## Sección 1.6.

---

### *Modelación de fenómenos de detonación de hidrógeno*

---

En esta sección se aborda el segundo enfoque referente a la modelación, de manera más específica referente a los fenómenos de detonación del gas hidrógeno. Algunos de los trabajos más relevantes se enlistan a continuación:

1. (*Goldin et al., 2024*):

Se propone un modelo simplificado en una dimensión de combustión, que incluye los efectos de compresibilidad, difusión y conducción del calor, viscosidad y liberación exotérmica de calor.

El modelo propuesto es capaz de predecir las ondas generadas en la detonación y deflagración de hidrógeno. Dichas ondas predichas son análogas a las ondas descritas por la teoría de combustión, además, el modelo es capaz de predecir la transición espontánea de la deflagración a la detonación. Así mismo, se muestra que a cuando el combustible se encuentra a temperaturas bajas se es capaz de generar una deflagración.

Finalmente, se observan dos tipos de ondas de detonación; ondas lentas con número Mach pequeño y ondas rápidas con número Mach grande.

2. (*Yang et al., 2024*):

Se propone un modelo que simula tres entornos de combustión espontánea de hidrógeno; explosiones confinadas de hidrógeno, explosiones de nubes de gas y explosiones de mezcla de hidrógeno. Además, propone estrategias de mitigación de explosiones del mismo gas.

Dicho modelo ayuda a la extensión del conocimiento de las detonaciones de hidrógeno ampliamente estudiado, sin embargo, las características de deflagración aún se ven limitadas.

También, muestra que los materiales porosos tienen un efecto dual al promover e inhibir las explosiones del gas hidrógeno, dependiendo de la densidad y número de capas, estos materiales pueden llegar a acelerar la transición de deflagración a detonación.

3. (*Haoran et al., 2023*):

Se realiza un estudio de seguridad y pureza de electrolizadores alcalinos para la producción a gran escala. En el cual se observa que la operación de electrolizadores alcalinos operados con baja carga no solo muestra una ineficiencia en el proceso, sino que muestra una degradación de los electrodos afectando la vida útil del equipo.

Muestra que, si no se controla la temperatura del equipo, se acelera la degradación de los electrodos y también puede generar incidentes en los equipos.

Finalmente, la pureza del gas producido puede ocasionar fluctuaciones que, al tratar de generar una recirculación del sistema, puede generar explosiones del gas.

4. (*Shirvill et al., 2019*):

Se realizan estudios experimentales de detonaciones de hidrógeno confinadas a tubería de transporte con fugas de alta presión. Se observa que la velocidad de la flama en estos sistemas alcanza una velocidad de  $27 \frac{m}{s}$  y la máxima presión obtenida durante la detonación se encuentra en un rango de  $0.87 - 1.25 \frac{kg}{cm^2}$ .

Se observa que las explosiones en mezcla de hidrógeno-aire ocurridas en tuberías reportan una mayor presión de detonación que las ocurridas en tanques cilíndricos.

5. (*Konoplev et al., 2018*):

Se realiza un estudio en el que se analiza la implementación de gas hidrógeno en vehículos de transporte de carga, en el cual se observa que, aunque existe una disminución de gases contaminantes a la atmósfera, los riesgos a los usuarios son muy altos, generando escenarios altamente destructivos.

Así mismo se propone un rediseño de los vehículos de transporte de carga que contemple la seguridad del usuario en un vehículo que use tanto gas natural como gas hidrógeno.

Además de implementar en los vehículos un sistema de recipientes criogénicos para el gas hidrógeno.

Finalmente resulta necesario la continuación de estudios teórico-experimentales en este campo para poder tener una mayor comprensión de los requisitos de seguridad.

La Tabla 1.4 muestra la síntesis de los antecedentes consultados en esta sección.

Tabla 1.4: Síntesis de antecedentes detonaciones de hidrógeno

Autor y año	Propuesta	Resultados	Conclusiones
<i>Goldin et al., 2024</i>	Modelo de combustión que engloba efectos de compresibilidad, difusión, conducción de calor, viscosidad y calor exotérmico.	Se observan dos tipos de ondas; lentas con número de Mach pequeño y rápidas con número Mach alto.	El modelo predice las ondas de detonación análogas. Se es posible predecir la transición de detonación a deflagración.
<i>Yang et al., 2024</i>	Estudio numérico de detonaciones de hidrógeno en tres escenarios; confinación, nubes de gas y explosiones de mezcla. Propuesta de mitigación de explosiones.	La presión de deflagración se puede dividir en tres; constante, incremento y decremento. La explosión es esférica con centro en la fuente	A pesar de que las mitigaciones son favorables tienen grandes desventajas, como requerir grandes cantidades de gases inertes para funcionar.
Haoran et al, 2023	Análisis de seguridad, pureza y eficiencia de equipos de producción de hidrogeno	La ineficiencia eléctrica de las placas a baja carga genera zonas de no reacción, acorta la vida de la placa. A baja pureza de gas, el proceso se vuelve no viable.	La temperatura debe ser controlada para no degradar rápidamente los componentes del sistema. Bajas purezas pueden ocasionar explosiones de gas
<i>Shirvill et al., 2019</i>	Estudio de explosiones controladas de hidrógeno en escenario de fuga en tubos de alta presión.	La velocidad de la flama en estos sistemas es de $27 \frac{m}{s}$ y la sobrepresión generada se encuentra en un rango de $0.87 - 1.25 \frac{kg}{cm^2}$ .	La explosión en tubos de transporte a alta presión genera una mayor sobrepresión que en tanques de almacenamiento cilíndricos

Continua Tabla 1.4			
Autor y año	Propuesta	Resultados	Conclusiones
<i>Konoplev et al., 2018</i>	Análisis de seguridad durante la implementación de hidrógeno en motores de vehículos de transporte de carga comparado con gas natural.	Los modelos muestran que para escenarios de accidentes las consecuencias son altamente catastróficas. Reducción de gases contaminantes	Se propone desarrollar una base metodológica para el diseño de los cuerpos de los vehículos que mejore la seguridad. Continuación de investigación teórico-experimental.

Como se observó, aunque en muchos casos se presentan las variables de presión, flujo y temperatura, la mayoría de los trabajos consultados y reportados no tienen un enfoque en cuanto a los límites operacionales de los sistemas prototipos y se enfocan más en la optimización del proceso y en el estudio de las consecuencias de las combustiones espontáneas del gas combustible. Además de que el principal enfoque se encuentra en el diseño del interior del reactor.

La propuesta para este trabajo es el estudio de las variables operacionales; presión, flujo, velocidad y temperatura, su interacción con el entorno experimental, es decir, las líneas de transporte de tubería, accesorios y servicios que afecten al gas durante su movimiento del reactor, así como las alteraciones que, durante el transporte y uso, puedan afectar al mismo equipo.

## Hipótesis

El modelo desarrollado a partir de los datos experimentales permitirá definir con precisión los intervalos de seguridad operativa en el equipo prototipo desarrollado por para la generación y combustión directa de la mezcla de hidrógeno y oxígeno.

Además, este modelo será capaz de predecir condiciones de riesgo al identificar el comportamiento crítico de variables clave como presión, flujo y temperatura cuando estas excedan los límites establecidos.

Con base en estas predicciones, se podrán implementar sistemas de control efectivos para la mitigación y prevención de riesgos, mejorando la seguridad y confiabilidad del proceso en escenarios de alto riesgo como el desarrollo y operación de prototipos.

## Objetivos

---

### Sección 3.1.

---

#### *Objetivo General*

---

Desarrollar un modelo matemático que simule el comportamiento de las variables operativas clave: presión, temperatura, velocidad y flujo durante la operación de un equipo prototipo diseñado por (*Pacheco et al., 2023*) para la producción y combustión directa de una mezcla de hidrógeno y oxígeno en un quemador bajo condiciones atmosféricas.

---

### Sección 3.2.

---

#### *Objetivos Específicos*

---

1. Caracterizar los parámetros operativos del sistema de reacción, incluyendo presión, flujo volumétrico, composición, velocidad media del fluido compresible y temperatura, asociados al flujo de gas combustible.
2. Desarrollar un modelo matemático que relacione el flujo volumétrico con la presión operativa del sistema de reacción, y simular su comportamiento bajo diferentes condiciones.
3. Establecer correlaciones matemáticas entre las variables operativas clave, para describir de manera precisa los entornos de operación del sistema.
4. Simular el entorno experimental de generación y combustión de hidrógeno utilizando las correlaciones matemáticas desarrolladas, validando el modelo en condiciones operativas reales.

## Metodología

---

### Sección 4.1.

---

#### *Objetivo General*

---

Para la realización de este proyecto se realizó la caracterización mecánica del equipo prototipo, es decir, la toma de medidas, así como la determinación de las características geométricas de los elementos del entorno experimental (tuberías, accesorios e instrumentos).

Una vez obtenida la información mecánica del sistema se procedió con la caracterización de los parámetros operativos:

- Presión.
- Flujo.
- Temperatura.

Para el caso del parámetro de velocidad se realizó un cálculo mediante la implementación de las ecuaciones obtenidas del manual (*Crane, 1992*). Y para el parámetro de composición se realizó el cálculo mediante la obtención de las fracciones molares y másicas obtenidas por la estequiometría de la reacción (ecuación (1.3)).

Dado que el entorno experimental es susceptible a incidentes referentes a la detonación y deflagración del gas combustible, se realizaron pruebas de caracterización de presión de detonación, presión de deflagración, así como la velocidad de deflagración en la línea durante un fenómeno de *backfire*. Con el objetivo de conocer las posibles repercusiones de un fenómeno de estos y establecer los límites de seguridad.

Posterior al proceso de caracterización de parámetros operativos se inició con el desarrollo del modelo matemático. Como primer paso se efectuó una aproximación simplificada del comportamiento referente a la presión y al flujo del gas, tomando como consideración algunos parámetros constantes, así como información técnica del equipo, como el voltaje y la corriente suministrada por mencionar algunos, así como la información geométrica de la tubería.

Una vez obtenida la simulación del modelo con simplificaciones se agregaron consideraciones que aproximen el modelo a un comportamiento más real, para finalmente realizar la simulación y obtener los resultados.

En las siguientes secciones se presenta la metodología detallada de cada uno de los objetivos específicos.

---

## Sección 4.2.

---

### *Objetivo 1*

---

El propósito del objetivo específico 1 es obtener toda la información de las variables clave:

1. Presión.
2. Flujo.
3. Velocidad de flujo.
4. Composición.
5. Temperatura

Es decir, observar las tendencias de las variables operativas y su comportamiento cuando interactúan con el sistema de válvulas, tuberías y accesorios o entorno experimental. Así como obtener los valores máximos, mínimos o constantes (si existen) de cada una de las variables ya enlistadas.

Para ellos, la metodología que se propone para la realización de este objetivo se muestra a grandes rasgos en la Figura 4.1,

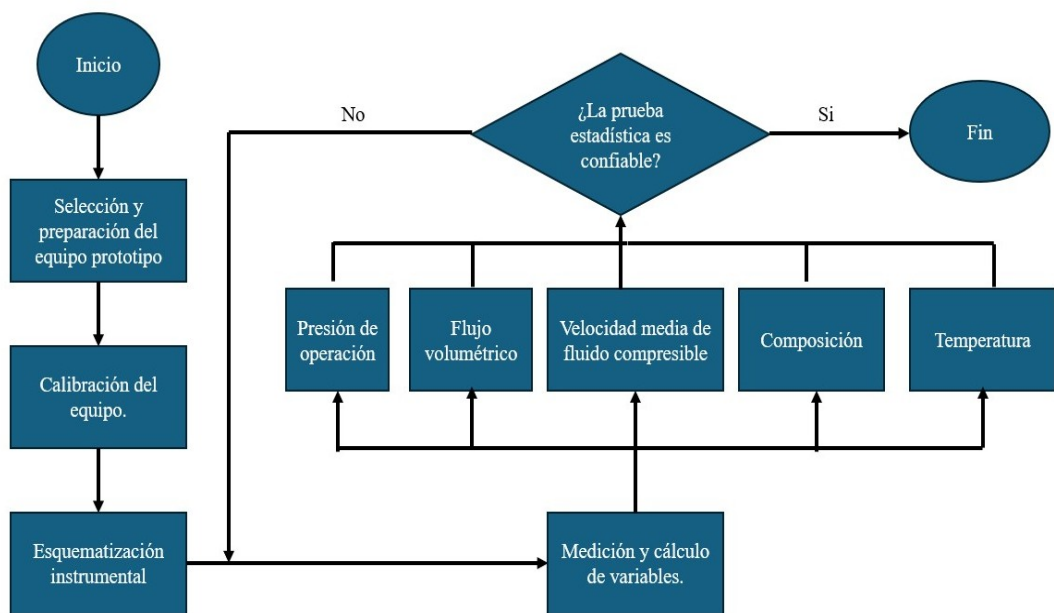


Figura 4.1: Metodología objetivo específico 1

Cada uno de los pasos desarrollados para la caracterización de los parámetros operativos se describe a continuación. Comenzando con la selección del equipo prototipo.

#### 4.2.1 Selección preparación y verificación del equipo prototipo

El equipo de reacción que se seleccionó para el desarrollo de esta prueba es el equipo prototipo de producción de gas hidrógeno-oxígeno mediante electrolisis en celda húmeda diseñado por (Pacheco *et al.*, 2023).

El sistema emplea como electrolito una solución de hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) con concentración  $2 M$ . Concentración comúnmente reportada y utilizada según los antecedentes revisados.

Una vez seleccionado el equipo se preparó la solución de  $NaOH$ , primero se pesaron  $0.85 kg$  de  $NaOH$  en una balanza analítica, los cuales se disolvieron en agua tridestilada hasta completar un volumen de  $1 dm^3$  el cual se preparó en un matraz aforado con fondo plano. El proceso se realizó vertiendo de manera cuidadosa el  $NaOH$  en el agua y agitando uniformemente dada la propiedad exotérmica de la mezcla. Se preparó un litro extra con el fin de tener una reserva en caso de que la primera solución se agotara con la utilización del equipo en las pruebas.

Se continuó con el llenado del tanque del reactor utilizando alícuotas de  $0.05 dm^3$ , esto con el fin de evitar derramamientos de solución fuera del reactor previniendo incidentes, se mantuvo un nivel del 75% de la capacidad total, conforme a heurísticas de diseño (Turton *et al.*, 2012).

Para monitorear el consumo de electrolito durante las pruebas experimentales, se implementó una escala de medición que se instaló en la parte frontal del equipo de reacción como se muestra en la Figura 4.2:

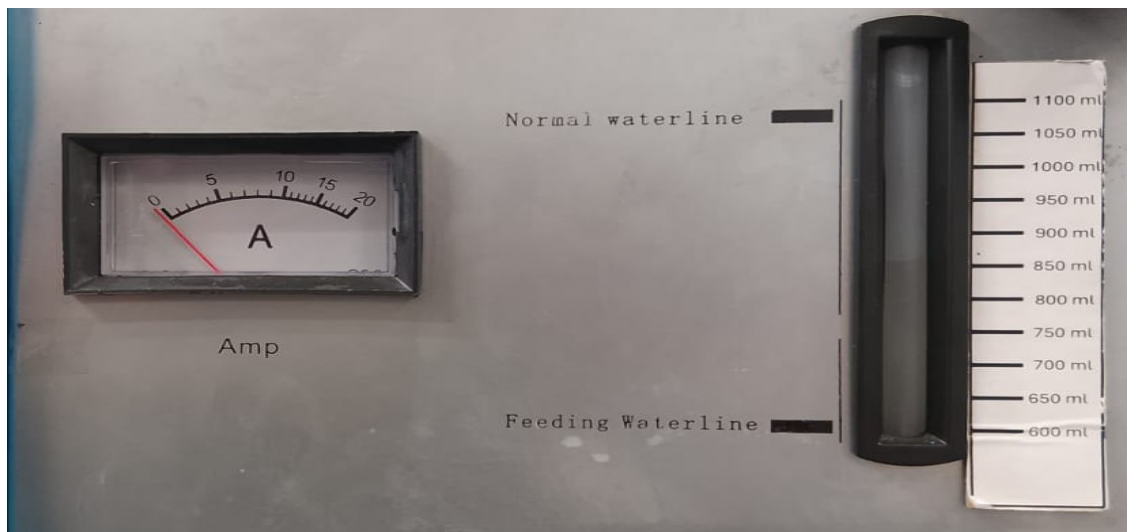


Figura 4.2: Amperímetro y regla de medición de nivel de electrolito

Posteriormente se verificó el equipo de acuerdo con las recomendaciones propuestas por (Pacheco *et al.*, 2023), verificando el correcto funcionamiento de todos los componentes del prototipo, incluido el quemador atmosférico.

Adicional, se realizaron mediciones de las líneas de tubería del reactor, así como del tanque de reacción, la barrera hidrodinámica o burbujeador y el quemador atmosférico. Se midieron los volúmenes de los tanques y tuberías con probetas graduadas. Estos volúmenes también se determinaron mediante cálculos geométricos, aproximando los componentes a cilindros y ortoedros.

Así mismo se realizó el cálculo del error del volumen total ocupado por el gas de Brown durante las pruebas con los datos obtenidos experimentalmente y los datos calculados, esto mediante la ecuación (4.1)

$$\%e = \frac{|VE - VR|}{VR} \quad (4.1)$$

Donde

- $VE$ : valor experimental.
- $VR$ ; Valor real

Para este caso  $VR$  se tomará como el volumen calculado teóricamente.

Con esos datos se desarrollaron diagramas detallados en 2D y 3D a escala 1:5 (Jensen *et al.*, 2004), utilizando el software *SketchUp* (versión online) y *AutoCAD 2024*.

Una vez obtenida la información mecánica del sistema de producción y desarrollados los diagramas se procedió a la caracterización de los parámetros operativos.

## 4.2.2 Caracterización de parámetros operativos

Para las pruebas de caracterización de las variables de presión y flujo, se determinó un diseño de experimentos con dos factores y tres tratamientos, es decir un diseño de experimentos  $2^2$ , por lo que se realizaron cuatro pruebas de cada parámetro a medir (*Gutiérrez & De la Vara, 2008*).

Para los casos de velocidad y composición se realizaron cálculos teóricos, basados en diferentes conceptos y leyes que se describirán en su correspondiente sección.

### 4.2.2.1 Presión de descarga

Para la caracterización de la presión de descarga de la línea principal se utilizó un manómetro digital (transductor de presión genérico marca ASHTA, China) conectado mediante un arreglo de interfaz a una placa Arduino y una PC. La Figura 4.3 muestra un esquema en 3D del diseño del arreglo experimental para las pruebas de presión de descarga.

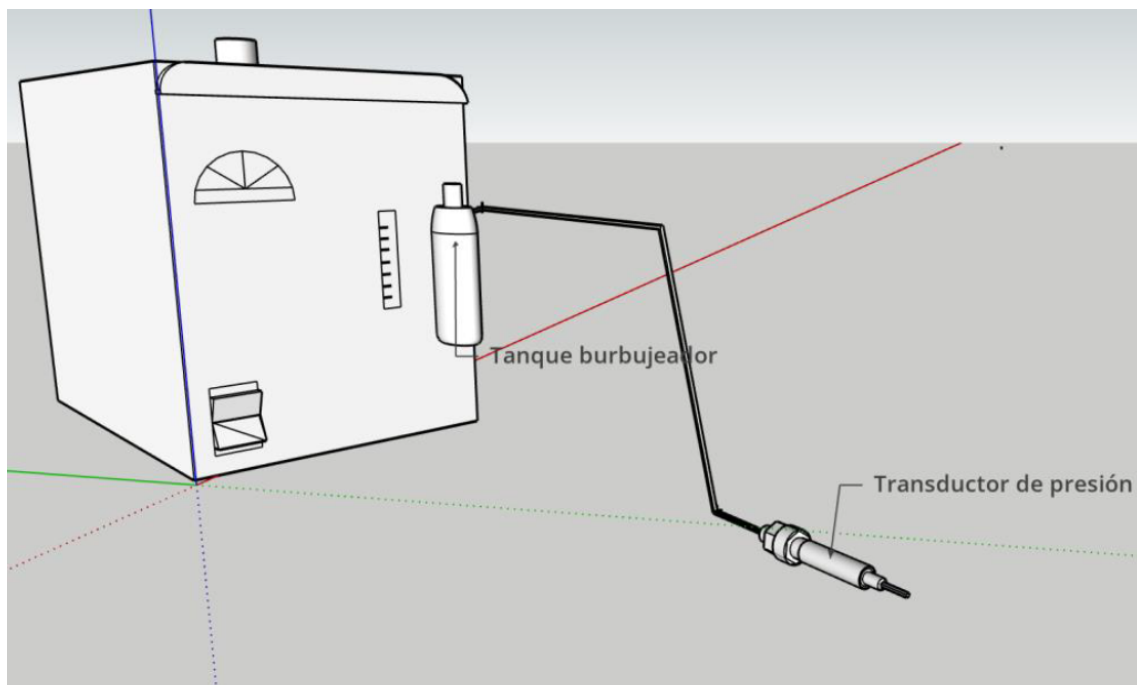


Figura 4.3: Diseño de arreglo experimental pruebas de presión

El transductor de presión se colocó lo más cerca posible de la salida del gas, esto con el fin de tener una mayor precisión de la medición del parámetro y no obtener datos afectados por la existencia de alguna caída de presión en una tubería más larga (*Turton et al., 2012*).

Los tres tratamientos que se realizaron fueron los siguientes:

a. Arranque del equipo (vacío (sin gas)):

Antes de iniciar la producción de gas, el sistema se encuentra vacío (sin gas). Se encendió el equipo y se cuantificó el tiempo en el que tarda en estabilizarse, una vez obtenido ese tiempo se corrieron todas las pruebas en dicho intervalo.

Se monitoreo el comportamiento de la presión con la interfaz Arduino y el transductor de presión. Se registraron las presiones iniciales para establecer una línea base y se opera el equipo hasta su presión máxima de operación.

b. Operación normal estable:

Durante la producción continua de gas en condiciones estables, se monitoreó la presión generada en la línea de descarga cuando esta se encuentra en descarga de gas y cuando se encuentra en producción, buscando el punto en que ambas son iguales. Para ello se graduó la válvula de descarga del quemador atmosférico con una regla circular de precisión o escala de división de  $10^\circ$  sexagesimales y se llevó a cabo una prueba de sensibilidad con diferentes intervalos de apertura partiendo del punto de arranque y del punto máximo.

c. Descarga por consumo superior a la producción:

En situaciones donde el consumo de gas en el quemador supera la producción de la celda, se evaluaron los cambios en la presión del sistema. Esta prueba busca determinar a partir de un mayor consumo el punto de no recuperación y las presiones que se presentan durante este escenario.

Posterior a la captura de datos, se analizaron los datos en Microsoft Excel donde se realizó estadística básica (promedio y desviación estándar). Así como se graficó el comportamiento de la presión de operación respecto del tiempo en los diferentes escenarios.

#### 4.2.2.2 Flujo de gas combustible

La caracterización del flujo volumétrico de gas combustible se realizó mediante la válvula del quemador atmosférico y un flujómetro escalado de  $1 - 3 \frac{dm^3}{s}$  marca Hilitand modelo LZQ-7, Estados Unidos. Los datos que se fueron observaron en el flujómetro se fueron registrando mediante evidencia audiovisual (cámara de 30 *fps*). El diseño del arreglo experimental se muestra en la Figura 4.4

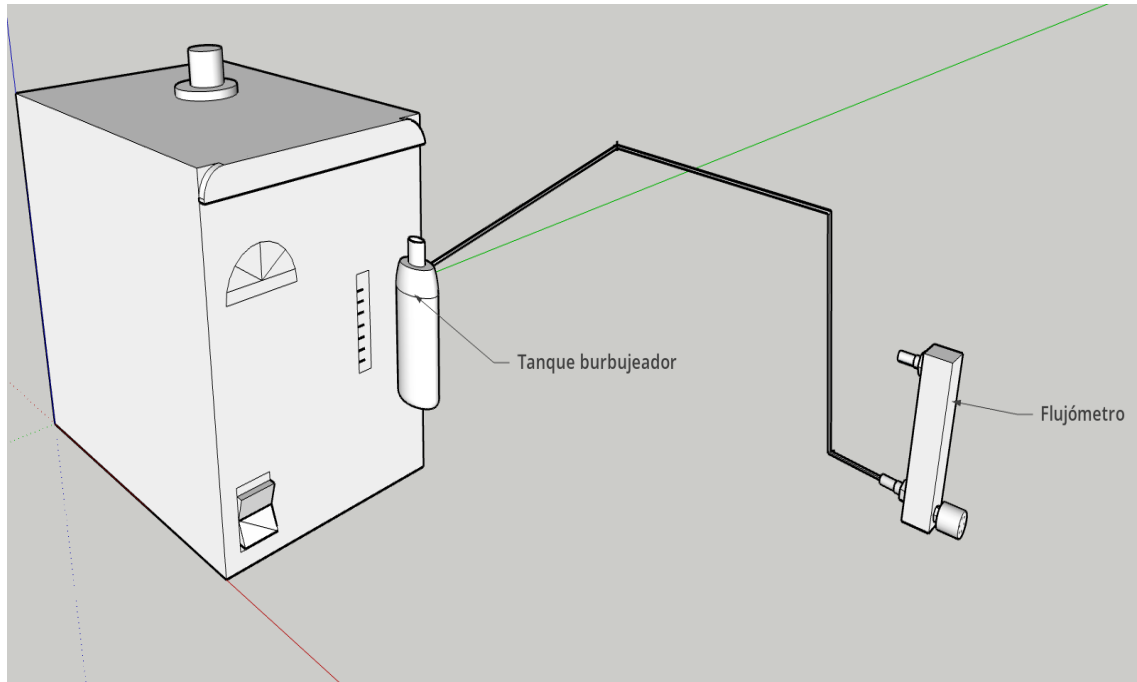


Figura 4.4: Diseño de arreglo experimental pruebas de flujo volumétrico.

Los tres tratamientos para este parámetro son similares a los tratamientos para la presión enumerados a continuación:

- a. De la presión máxima de operación al vacío (sin gas).

Se puso en operación el sistema de reacción hasta el punto máximo determinado con las pruebas de la sección anterior. Una vez alcanzado este punto, se abre por completo la válvula del quemador atmosférico haciendo pasar el gas combustible por el flujómetro. Mediante un registro audiovisual se grabó la evolución respecto del tiempo del gas que pasa por el flujómetro, siendo el flujo máximo el equivalente al punto más alto que la esfera dentro del flujómetro alcanza.

Una vez realizadas las pruebas se generó una gráfica de flujo volumétrico respecto del tiempo.

- b. Operación normal estable

Para esta prueba se realiza el estudio a diferentes ángulos de apertura de la válvula del quemador atmosférico, hasta encontrar el ángulo en donde el flujo volumétrico tenga un comportamiento en el cual la cantidad que se consume sea menor a la cantidad producida.

Para ello se espera que el sistema de reacción sea capaz de alcanzar el punto máximo pasado un determinado tiempo de operación. Una vez determinado a que apertura es este comportamiento se registraran los datos de flujo volumétrico que arroje el flujómetro.

- c. Punto de no retorno

Al igual que el inciso anterior, se busca un punto definido por un ángulo de apertura en el que el consumo sea mayor a la capacidad de producción del sistema.

Por ello se espera que el sistema no sea capaz de alcanzar el punto máximo y constantemente se encuentre realizando la producción del gas combustible.

Una vez determinado el ángulo de apertura de la válvula se realizó la toma de datos para generar el diagrama flujo volumétrico-tiempo.

#### 4.2.2.3 Composición

Con los resultados de flujo volumétrico obtenidos en la sección anterior se hace la conversión de flujo volumétrico a flujo másico, para ello se hace un producto con la densidad del gas, dicho cálculo se expresa en la ecuación (4.2)

$$\dot{W} = \rho \dot{Q} \quad (4.2)$$

Dado que la densidad también depende de la presión se tomó la densidad asociada con la presión máxima de operación, dicho cálculo se realizó con la ecuación (4.3)

$$\rho = \frac{M_{HHO}P}{RT} \quad (4.3)$$

Se obtiene un valor de densidad asociado a un valor específico de presión experimental, este valor de presión también tiene asociado un valor de flujo volumétrico, con los valores calculados de densidad y los valores experimentales de flujo volumétrico se hacen los cálculos con la ecuación (4.3) para obtener el flujo másico.

Posteriormente, se obtiene la fracción masa del gas *HHO*, por medio de las ecuaciones (4.4) y (4.5):

$$\omega_{H_2} = \frac{M_{H_2}}{M_{HHO}} \quad (4.4)$$

$$\omega_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{M_{HHO}} \quad (4.5)$$

#### 4.2.2.4 Velocidad media de fluido compresible

Para el cálculo de velocidad media de fluido compresible se utilizó la información geométrica de la línea de proceso obtenida durante la caracterización del equipo de reacción, es decir, el desarrollo de los diagramas, y con los datos obtenidos de flujo volumétrico se realizó el cálculo de la velocidad implementando la ecuación (44) (*Crane, 1992*)

$$u = \frac{\dot{Q}}{a} \quad (4.6)$$

donde

- $u$ : es la velocidad de fluido compresible.
- $\dot{Q}$ : es el flujo volumétrico.
- $a$  : es el área de sección transversal.

Se efectuó el cálculo de cada valor de flujo obtenido en la sección anterior para así poder tener no solo la velocidad de flujo promedio, sino tener una aproximación de la evolución de la velocidad respecto del tiempo y obtener la gráfica de velocidad respecto del tiempo en cada uno de los tratamientos realizados para el parámetro de flujo.

#### 4.2.2.5 Temperatura

Para obtener los datos de temperatura se utilizó un termopar tipo K y la interfaz Arduino, acoplado a una tubería de cinco centímetros de longitud, esto con el fin de que el sensor este lo más cercano a la salida del tanque burbujeador, dicho arreglo se muestra diseñado en la Figura 4.5.

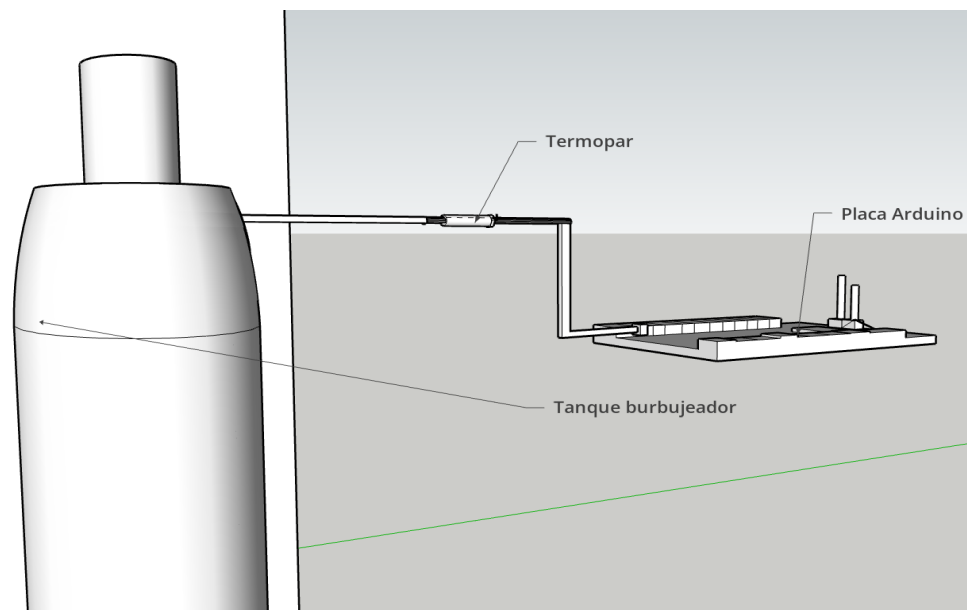


Figura 4.5: Diseño de arreglo experimental pruebas de temperatura

---

### Sección 4.3.

---

#### *Objetivo 2*

---

Una vez obtenida la información de las variables operativas clave y su comportamiento con el entorno experimental, resulta de interés conocer la relación entre el flujo y la presión de

descarga, observar su tendencia y establecer correlaciones. Así mismo, determinar los escenarios de incidentes como la deflagración o la detonación del gas combustible y la respuesta de las variables en el sistema de producción.

La Figura 4.6 muestra de manera general la metodología implementada para la realización del objetivo específico 2. Posteriormente se explica a detalle cada uno de los procesos que se siguieron para el objetivo.

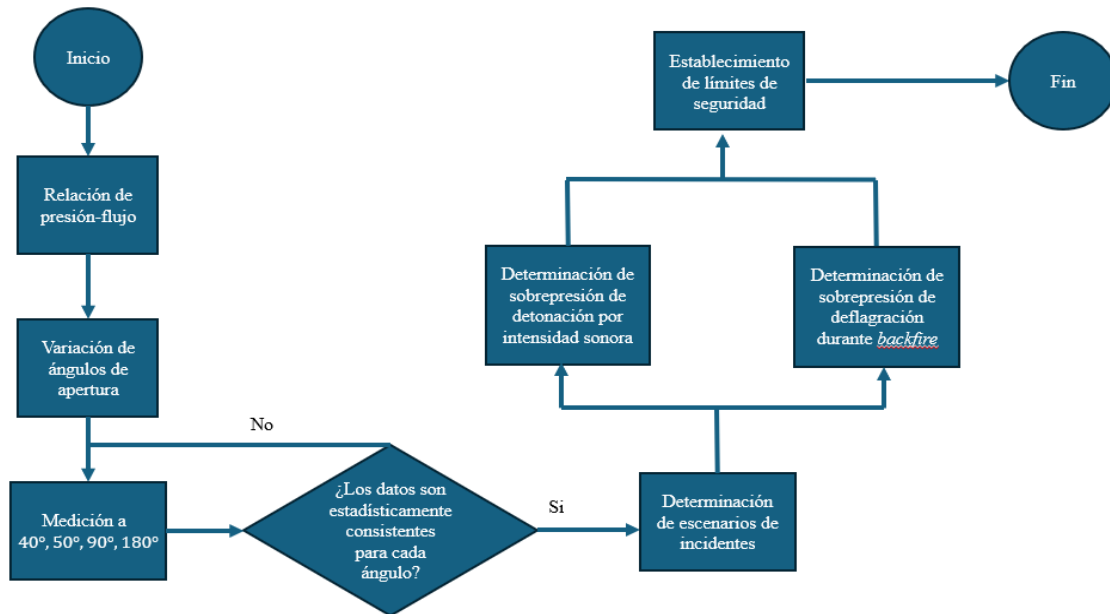


Figura 4.6: Diagrama de flujo objetivo 2

### 4.3.1 Relación Flujo-Presión

Para la caracterización de la relación de presión-flujo se realizó una prueba experimental la cual implementa una trampa de agua. Esta trampa de agua consiste en dos componentes principales:

- Un tubo falcón de  $0.05 \text{ dm}^3$  el cual lleva una línea de manguera por dentro y se encuentra inundado por el líquido.
- Una tina con agua para generar una presión hidrostática. El tubo falcón se coloca dentro de esta tina con agua, dejando por debajo de la superficie la parte referente a la tapa con rosca de este.

Para poder retirar el aire contenido dentro del tubo y la línea de manguera se utilizó una jeringa de  $0.02 \text{ dm}^3$ , que funcionó como una bomba de vacío manual, para evitar que el sistema se llenara de aire nuevamente se colocó la manguera dentro de la tina de agua y se

evitó que la parte que queda fuera del tubo estuviera a un nivel de altura igual o mayor a la parte dentro del tubo.

La trampa de agua se encuentra conectado al equipo de generación por medio de la misma tubería que se colocó dentro del sistema y el quemador atmosférico del equipo, y este a su vez al sistema de reacción. La Figura 4.7 muestra una propuesta de la trampa de agua diseñada para estas pruebas.

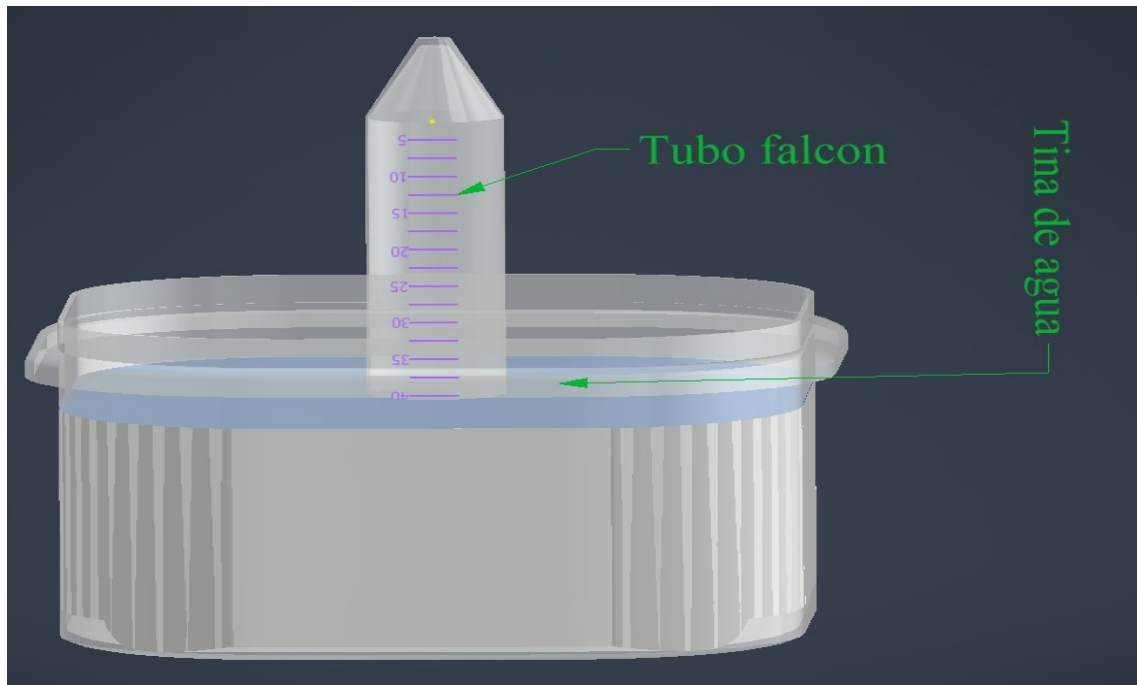


Figura 4.7: Propuesta experimental relación flujo-presión

Al mismo tiempo, se colocó un sensor entre el tanque burbujeador y el quemador atmosférico del sistema de reacción que irá monitoreando el cambio de la presión conforme se dé la descarga del gas combustible dentro del sistema experimental.

Se monitoreó el tiempo en que el gas desplaza un volumen conocido de agua a diferentes ángulos de apertura de la válvula, siendo estos de  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $360^\circ$ . Para ello se tomará registro mediante video de las pruebas a realizar.

### 4.3.2 Presión de detonación

En el entorno experimental se contemplan dos principales escenarios de incidentes; la deflagración del gas debido a un fenómeno de *backfire* y la detonación de este.

Para comenzar con el estudio de los escenarios de incidentes se caracterizó el proceso de detonación mediante la determinación de la sobrepresión que esta genera. Para ello se midió la magnitud de la intensidad sonora que genera el fenómeno.

Para llevar a cabo detonaciones controladas de gas se construyó una plataforma de detonación, en la que, por medio de un instrumento de inyección manual, se tomó una muestra del gas producido y, con una mezcla de jabonosa, se colocó una burbuja en el centro de la plataforma, con esto se asegura un control adecuado de la cantidad de gas y de la ubicación de la burbuja. La Figura 4.8 muestra un esquema en tres dimensiones de la plataforma de detonación a utilizar.

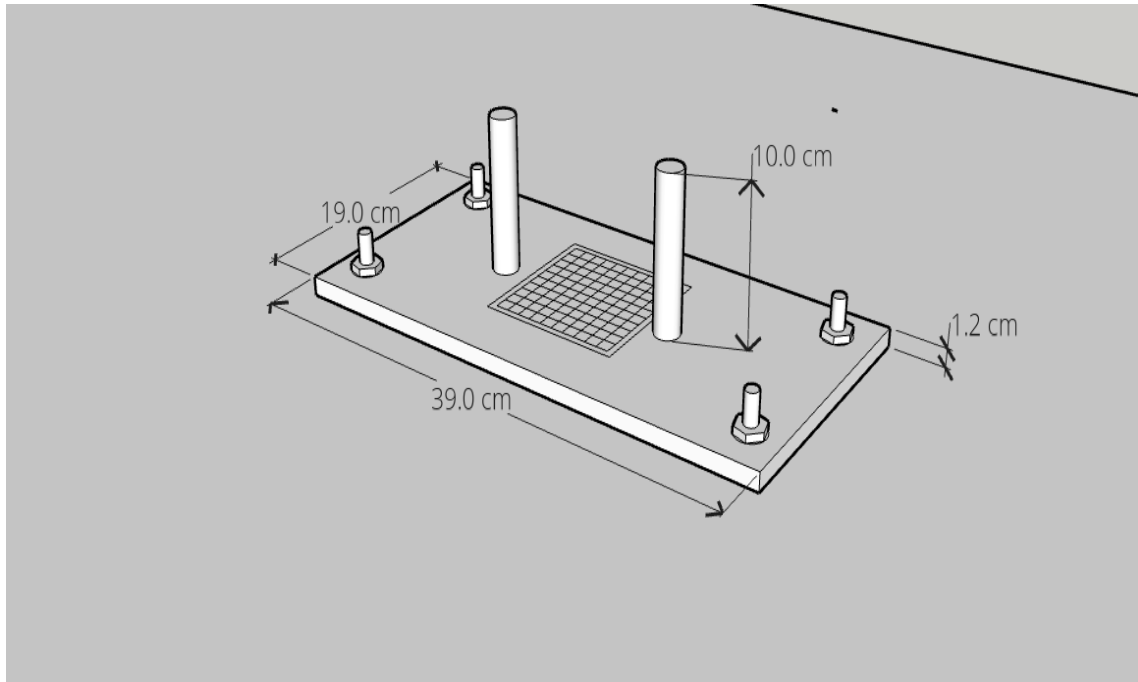


Figura 4.8: Esquema 3D plataforma de detonación

Para la realización de la prueba se consideran como factores experimentales el volumen de gas combustible a detonar, evaluados a dos volúmenes específicos ( $0.02 - 0.04 \text{ dm}^3$ ) y como tratamiento la distancia al instrumento de medición de intensidad sonora (sonómetro).

Con el objetivo de garantizar que durante las pruebas se tuviera un volumen específico se realizaron análisis del tipo de jabonadura y la proporción de glicerina que tendrá la mezcla de esta, para obtener una burbuja lo más estable posible. Así mismo, se colocó en el centro de la plataforma de detonación una regla de medición cuadrada con  $0.05 \text{ m}$  de lado, con el objetivo de medir el diámetro de la semiesfera que se forma al inyectar la burbuja en la plataforma, el cálculo se realizó con la expresión de la ecuación (4.7)

$$V = \frac{2}{3}\pi r^3 \quad (4.7)$$

Como paso adicional previo a la toma de datos de intensidad sonora se definió un sistema coordenado cartesiano cuyo origen se ubicó en la fuente de la detonación (burbuja de gas), este sistema se ilustra en la Figura 4.9.

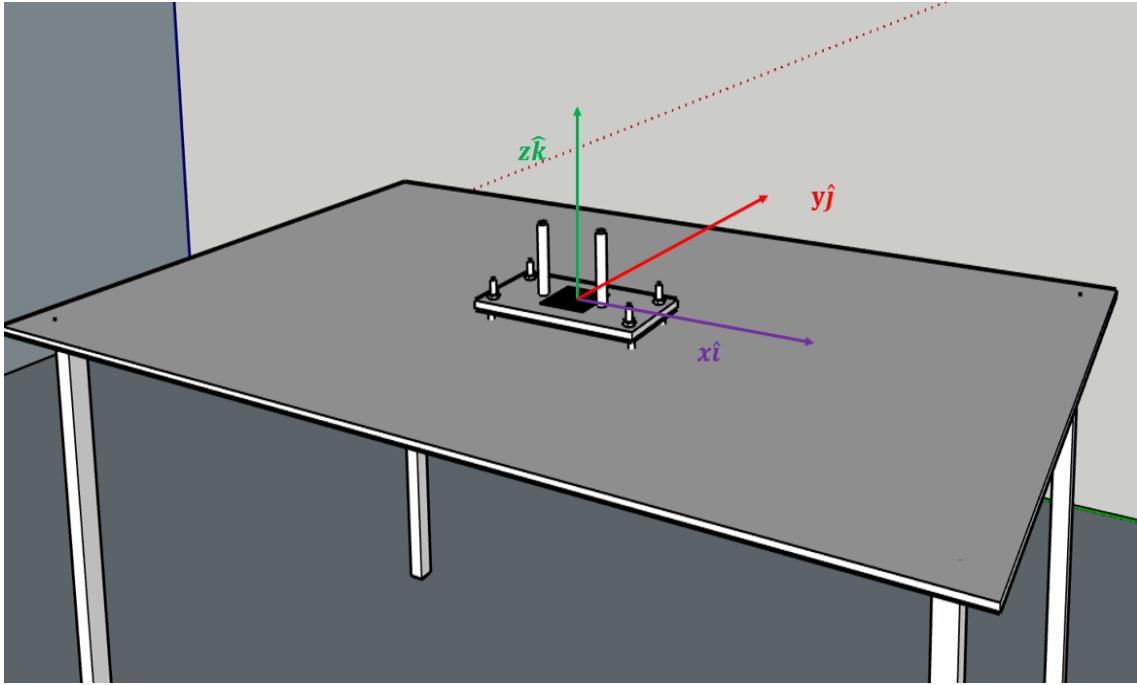


Figura 4.9: Sistema coordinado de medición

En los tres ejes coordenados la distancia mínima a la que se ubica el sonómetro  $0.2\text{ m}$  de la fuente y se fue alejando a razón de  $0.2\text{ m}$  a lo largo de cada componente direccional hasta completar  $1\text{ m}$  de distancia de separación de la fuente.

Con los datos de intensidad sonora obtenidos durante las pruebas, se realizó el cálculo de la sobrepresión de detonación utilizando la definición de decibelio, definida en la ecuación (4.8) (*Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2002*).

$$dB = 20 \log_{10} \left| \frac{P}{P_0} \right| \quad (4.8)$$

Donde  $P_0$  es una presión de referencia con valor de  $20\ \mu Pa$ . Tanto la variación de la intensidad acústica medida en decibelios como la sobrepresión se graficaron respecto de la posición para observar su comportamiento y se realizó la estadística básica para cada variable medida.

### 4.3.3 Deflagración en escenario de *backfire*

Se define como *backfire* o retroceso de flama al fenómeno en el cual la flama viaja dentro de la línea desde el quemador atmosférica hasta llegar al sistema de producción causado cuando la velocidad del flujo de gas es menor a la velocidad de propagación de flama ocasionando que el gas se deflagre dentro de la línea.

Durante este fenómeno se estudió la sobrepresión generada por la deflagración del gas dentro de la línea, así como la velocidad de propagación de flama.

Para reproducir un fenómeno de *backfire* en condiciones controladas se construyó una plataforma de deflagración recubierta con material color negro mate y provista de una escala graduada con tamaño de paso de  $0.01\text{ m}$ . En esta plataforma se colocó una línea de polipropileno que se conectó por medio de una válvula de cierre manual al sistema de producción de gas combustible.

Para obtener la caracterización de la sobrepresión de deflagración se colocaron a lo largo de la línea tres sensores de presión ubicadas de la siguiente forma:

- Inicio: Se encuentra a  $0.05\text{ m}$  de la válvula de cierre manual que conecta el sistema de reacción con la línea de prueba.
- Centro: Tomada a la mitad de la línea de prueba a  $0.93\text{ m}$ .
- Final: Se colocó a  $0.05\text{ m}$  antes del final de la línea de prueba.

Finalmente, a  $0.05\text{ m}$  después del último sensor, se conectó a la línea un quemador de prueba con una configuración diferente del quemador típico que utiliza en el sistema de producción, dado que esta no tiene el arreglo antirretorno de flama. El arreglo propuesto se muestra en la Figura 4.10.

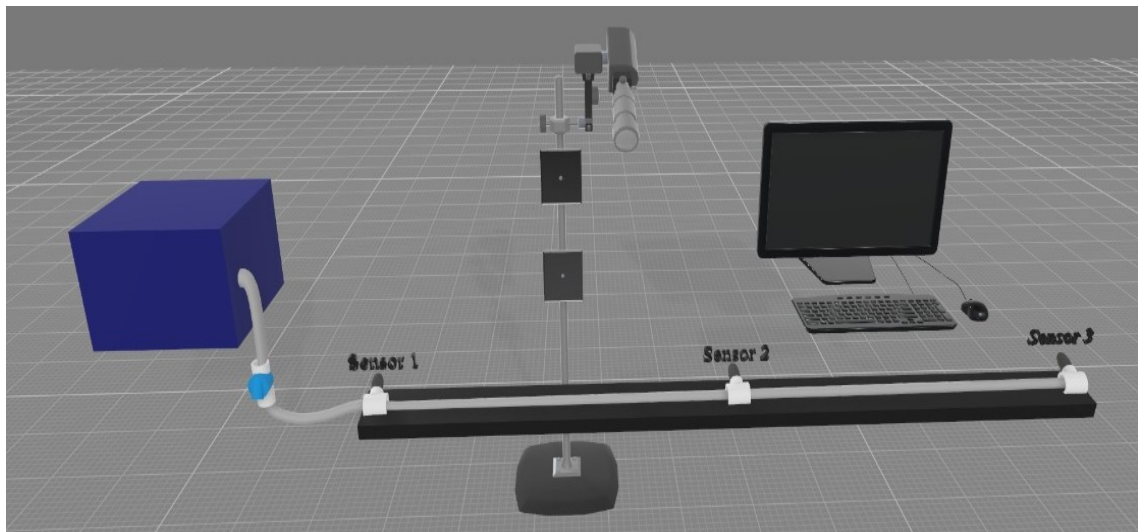


Figura 4.10: Diagrama arreglo experimental deflagración

La determinación de la velocidad de propagación de flama se efectuó mediante la captura de videos del fenómeno utilizando una videocámara Sony HDR-CX405 de  $60\text{ fps}$ . Se realizó un análisis de imagen mediante el software MATLAB a los videos obtenidos del fenómeno de *backfire*, el cual determina el tiempo en que ocurre el fenómeno analizando la intensidad lumínica que se presenta como consecuencia de la deflagración, estableciendo el punto de inicio y de final de la deflagración. Una vez determinado el tiempo de luminiscencia, se calcula la velocidad mediante la definición expresada en la ecuación (4.9) (*Halliday et al., 2009*).

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \quad (4.9)$$

Debido a que la definición cinemática de la velocidad matemáticamente se expresa como una igualdad vectorial, es necesario simplificar el sistema a una sola dirección, para este caso, se escoge arbitrariamente el eje  $x\hat{i}$  pudiendo manipular la variable como una cantidad escalar y simplificar el análisis, esta simplificación se expresa en la ecuación (4.10).

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = u_x \hat{i} \quad (4.10)$$

Una vez construido y acoplada la plataforma al sistema experimental el primer paso es cerrar la válvula manual con el equipo apagado. Una vez el sistema de reacción se encuentre aislado, se encendió y se dejó trabajar hasta su punto máximo de operación (paro), cuando el sistema alcanzó este punto se abrió el paso de gas a la línea de prueba.

En el otro extremo de la línea de prueba, se encendió el quemador de pruebas, posterior al encendido el quemador de pruebas se cerró el paso de gas combustible forzando a la disminución de la velocidad de flujo induciendo el fenómeno de *backfire*.

Se realizaron cuatro pruebas experimentales y se determinó el comportamiento promedio, así como se realizó el análisis de la desviación estándar.

---

#### Sección 4.4.

---

##### *Objetivo 3*

---

Con la información obtenida durante el proceso de caracterización, la cual incluye la relación presión-flujo y los escenarios de incidentes, se dispone de las variables operativas clave, así como la información técnica del sistema de reacción y el comportamiento experimental del sistema.

Una vez establecidos los límites operacionales y caracterizado el comportamiento del entorno experimental, el siguiente paso a seguir es la modelación del sistema.

Para ello, en la Figura 4.11 presenta el algoritmo seguido en la construcción del modelo matemático que representa el entorno experimental estudiado.

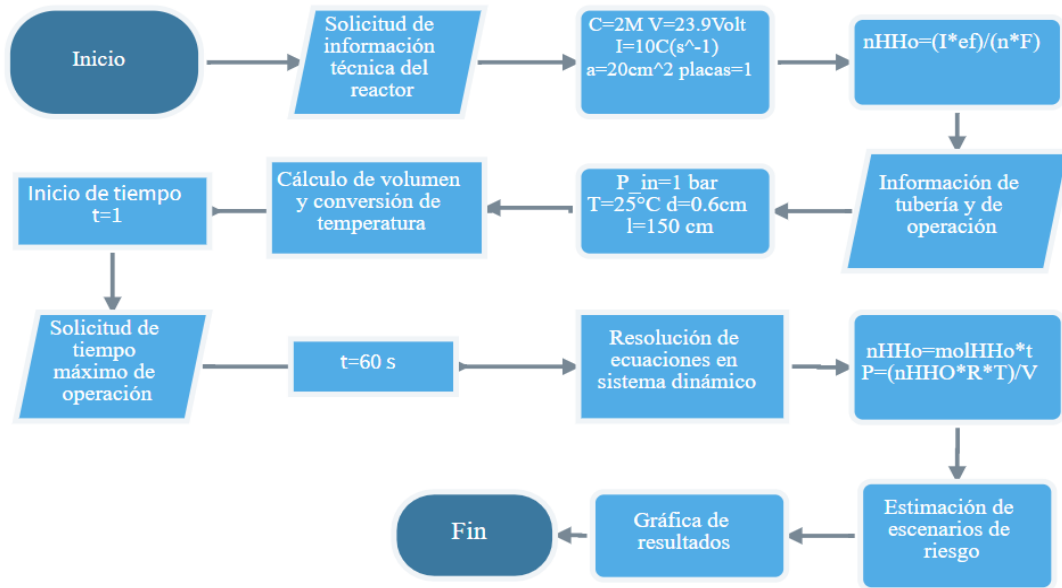


Figura 4.11: Diagrama de flujo algoritmo de solución

El primer conjunto de datos requeridos para el modelo corresponde a la información técnica del sistema de reacción, esta incluye:

- Voltaje suministrado a la celda electrolítica.
- Corriente que fluye a través de la celda.
- Área de reacción del electrolizador.
- Concentración de electrolito.
- Número de placas

El primer paso por desarrollar es el cálculo de moles producidos de HHO mediante la Ley de Faraday, el cálculo se realizó mediante la ecuación (4.11)

$$n_{HHO} = \frac{Ief}{nF} \quad (4.11)$$

Considerando una eficiencia de la celda del 80%, valor típico de estos sistemas (*Pacheco et al., 2023*).

A continuación, es necesario conocer cómo es el entorno experimental, es decir, la información mecánica de la línea de descarga del gas combustible, en otras palabras, conocer la longitud y el diámetro interno de la línea.

Para iniciar con el cálculo se definió las condiciones iniciales de las variables operativas clave:

- Presión inicial ( $1.033 \text{ kg cm}^{-2}$ ).
- Temperatura inicial ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Para este caso tanto la velocidad, como el flujo se convierten en funciones dependientes de la presión, e implícitamente dependientes del tiempo, como se expresa en la ecuación (4.12).

$$u \propto \dot{Q} \propto P \propto t \quad (4.12)$$

De las variables operativas clave, se definió a la presión como la variable independiente, por lo que la simulación estará acotada inferior y superiormente por los valores máximos y mínimos de la presión, matemáticamente se expresa como la ecuación (4.13):

$$P, \dot{Q}, u, T \in [P_o, P_F] \quad (4.13)$$

Por lo que el modelo se delimita por el ínfimo y el supremo del conjunto de la variable presión, es decir:

- $P_0$ : La presión mínima de operación.
- $P_F$ : La presión máxima de operación.

Teniendo como principal clave, la Ley de Gases ideales, expresada en la ecuación (4.14) (*Smith et al, 2007*).

$$PV = nR_gT \quad (4.14)$$

Mientras que el flujo se obtiene despejando la ecuación (4.14) y a razón del cambio en el tiempo, en otras palabras, la ecuación (4.15):

$$\dot{Q} = \frac{n_{HHO}R_gTt}{P} \quad (4.15)$$

Una vez determinado el flujo volumétrico del gas combustible se determina la velocidad de flujo en la línea basados en estos valores obtenidos y se muestra su evolución respecto del tiempo, esto se realizó mediante el cálculo de la ecuación (4.16) (*Crane, 1992*)

$$u = \frac{\dot{Q}}{a} \quad (4.16)$$

Al mismo tiempo se hace el cálculo del riesgo por medio de la energía liberada conforme incrementa el tiempo, este cálculo se realizó por medio de la ecuación (4.17)

$$Q = 241.8n_{HHO} \quad (4.17)$$

Finalmente se determinó la cantidad máxima (en gramos) de gas que es posible almacenar, de acuerdo con la normativa correspondiente (*Diario Oficial de la Federación, 2012*). Dicho cálculo se realizó con la ecuación (4.18)

$$FR = \frac{PM_{HHO}10^{-3}}{338R_g} \quad (4.18)$$

Donde:

- $FR$ : es la cantidad máxima de gas que es posible almacenar.
- $M_{HHO}$ : es la masa molecular de la mezcla de gas combustible.

Finalmente se determina la equivalencia en gramos de  $TNT$ , típicamente reportado, de energía de detonación. Este cálculo se realiza con la ecuación (4.19) (*Cooper, 1996*).

$$Q = \frac{241.8n_{HHO}}{4.184} \quad (4.19)$$

Ya con las ecuaciones definidas, se elaboró un pseudocódigo en el software MATLAB R2024b, en el cual se define un tiempo de operación de 60 s, en este código se da la instrucción de generar las gráficas referentes a:

- Presión de operación.
- Flujo de descarga.
- Temperatura de gas combustible.
- Relación Flujo-Presión.
- Riesgo respecto del tiempo.
- Energía acumulada.
- Límite máximo de almacenaje.
- Energía de detonación.

---

## Sección 4.5.

---

### *Objetivo 4*

---

Finalmente, una vez establecidas las leyes y fórmulas que se implementaran en el modelo matemático, se desarrolló el modelo que simulará un entorno más real de operación.

Para realizar la simulación se implementó una Interfaz Gráfica de Usuario (*GUI*), este sistema permite una interacción usuario-computadora menos complicada a las líneas de texto típicas de los lenguajes de programación con la implementación de; botones, cuadros de texto, menús desplegables, barras deslizadoras, etc. (*Barragan Guerrero, 2008*).

Se colocaron en los menús desplegables y barras deslizadoras parámetros técnicos y geométricos como la longitud de la tubería, la conductividad del electrolito y la eficiencia del sistema, con el objetivo de observar su comportamiento a diferentes valores de estos.

Posteriormente, se realizó el cálculo por medio de la Ley de Faraday (ecuación (4.11)) del flujo molar con los datos de corriente y eficiencia, para posteriormente obtener un valor de flujo volumétrico a una determinada presión de operación.

A continuación, se realiza la simulación dinámica del sistema, resolviendo la Ley de los Gases ideales para obtener un valor de presión y realizando un recálculo del flujo volumétrico con los nuevos valores obtenidos de presión. Así mismo, con este valor de presión se obtiene la velocidad de flujo en la línea.

Por otro lado, se determina el volumen de gas acumulado en el sistema, calculando cada uno de los componentes de la mezcla y la mezcla misma.

Con los valores obtenidos del cálculo de flujo molar se determinó la cantidad de energía que libera y su evolución respecto del tiempo.

A continuación, se determinó el valor de presión y flujo molar máximo obtenidos de la simulación y se determinó el límite de gas que se puede almacenar de acuerdo con la normativa (*Diario Oficial de la Federación, 2012*), así como el equivalente explosivo de la cantidad de gas producida.

Finalmente, se presentaron los gráficos de la evolución de las variables y se realiza la comparación con el comportamiento observado experimentalmente.

## Resultados y discusión

### Sección 5.1.

#### Objetivo 1

#### 5.1.1 Selección preparación y verificación del equipo prototipo.

Se seleccionó el equipo prototipo desarrollado por (*Pacheco et al., 2023*), al cual se le realizó la toma de dimensiones de los componentes y líneas del sistema, con dicha información, se realizaron los diagramas en 2D y 3D, los cuales se muestran en las Figuras 5.1 y 5.2 respectivamente.

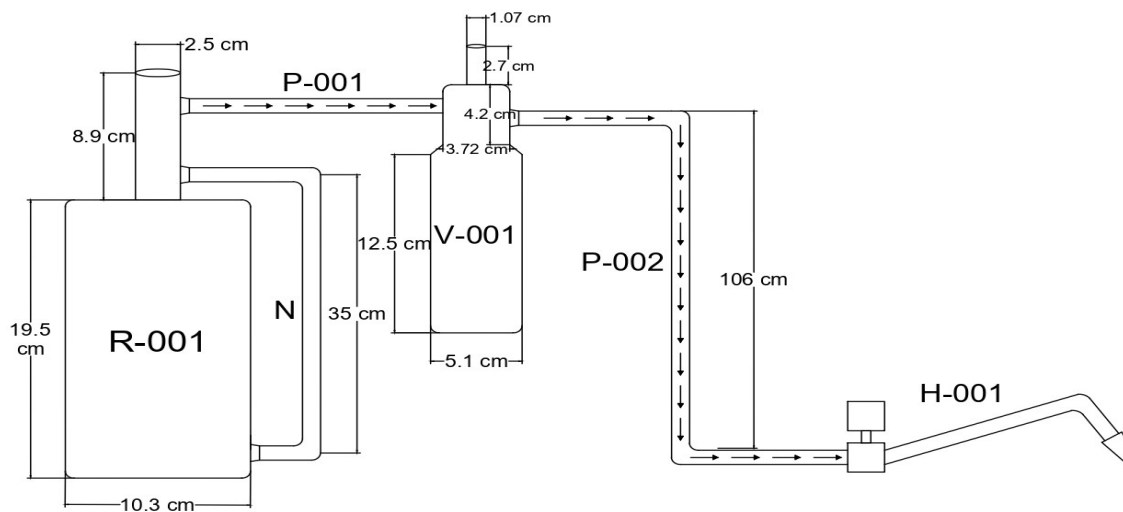


Figura 5.1: Diagrama 2D del equipo de reacción

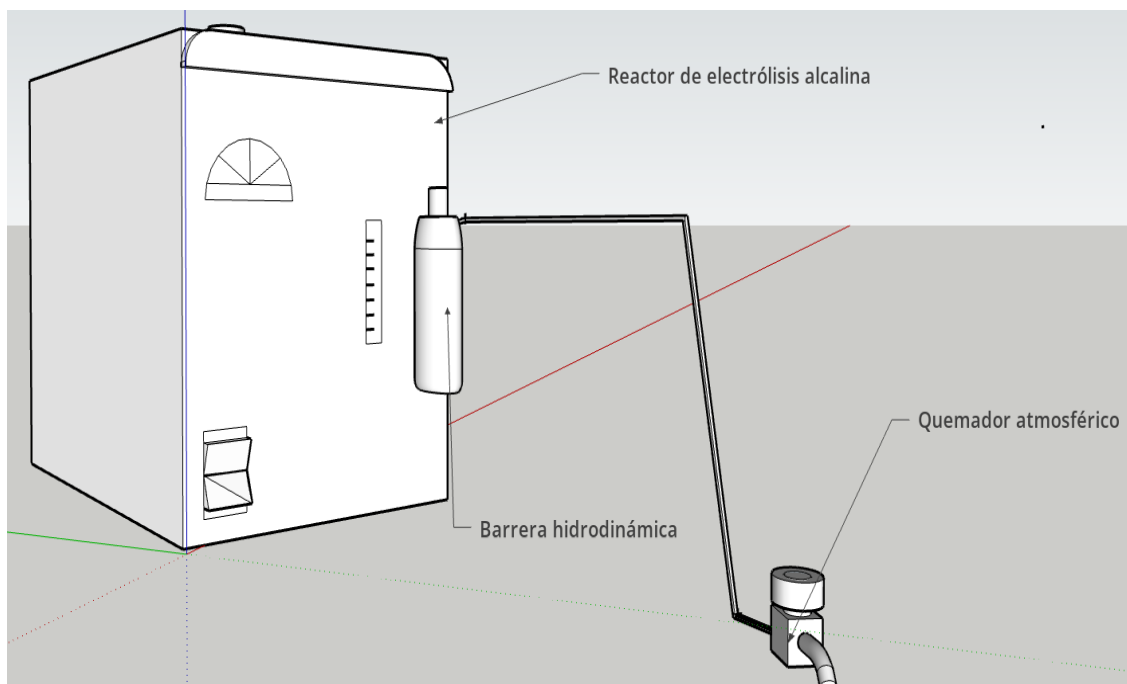


Figura 5.2: Diagrama 3D del equipo de reacción

La información mecánica del equipo (dimensiones, volúmenes) con los que se realizaron los diagramas se reportan en la Tabla 5.1

Tabla 5.1: Componentes sistema de producción HHO

Nomenclatura	Equipo	Dimensiones ( $m$ )	Volumen teórico ( $dm^3$ )	Volumen experimental ( $dm^3$ )	Material
R-001	Reactor de electrólisis alcalina	0.195, 0.103	2	2	Acero inoxidable
V-001	Tanque burbujeador	0.125, 0.051	0.363	0.363	Acero inoxidable
H-001	Quemador atmosférico	0.25, 0.015,	0.0562	0.0562	Acero inoxidable
N	Nivel de electrolito	$l = 0.44$ $d = 0.006$	0.008	0.009	Prolipropileno
P-001	Tubería de transporte reactor-burbujeador	$l = 0.146$ $d = 0.006$	0.002	0.003	Prolipropileno
P-002	Tubería de transporte burbujeador-quemador	$l = 1.06$ $d = 0.006$	0.0208	0.021	Prolipropileno

---

Así mismo, se determinó el error experimental en el cálculo del volumen del sistema, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Valores de volumen y error

Volumen teórico ( $dm^3$ )	0.081
Volumen experimental ( $dm^3$ )	0.0809
% de error	0.316

La siguiente sección se muestran los resultados obtenidos referentes a la presión de descarga.

### 5.1.2 Presión de descarga

Una vez programado y calibrado el transductor de presión para las pruebas de esta sección, se acopló por una línea de tubería de 0.05 m a la salida del tanque burbujeador. La Figura 5.3 muestra el arreglo del transductor de presión acoplado al sistema de reacción.



Figura 5.3: Sistema experimental presión de descarga

### 5.1.2.1 Arranque del equipo

El transductor de presión implementado para la medición de la presión de descarga obtiene datos de presión manométrica, para los resultados que se reportan a continuación se agrega el equivalente a una atmósfera ( $1.033 \frac{kg}{cm^2}$ ) para reportar en atmósfera absoluta.

Los valores que se obtuvieron de cada una de las diferentes pruebas experimentales se muestran en la Figura 5.4:

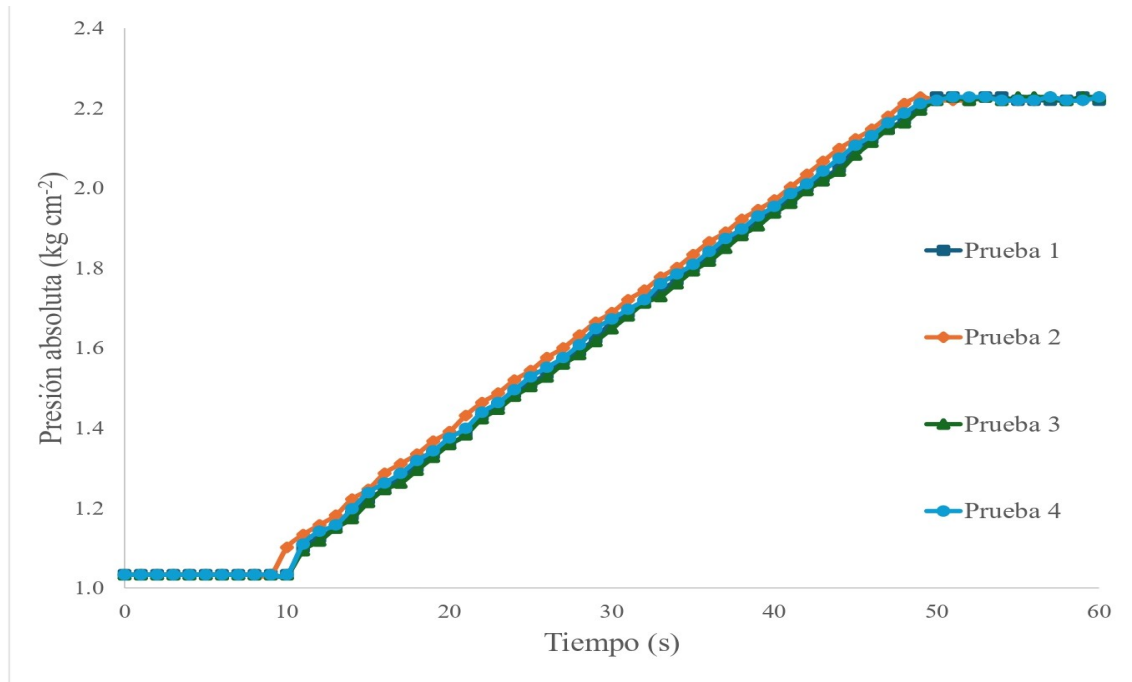


Figura 5.4: Comportamiento presión absoluta de descarga

Se puede observar que se empieza a recibir la señal de la presión después de los 10 s de prueba, debido a que el gas debe vencer la presión hidrostática del tanque burbujeador, después de ese tiempo, se muestra una tendencia lineal creciente del gas combustible.

Se observó que el sistema para alrededor de los 45 s de operación, posterior a ese tiempo la presión comienza a aumentar muy lentamente hasta que se estabiliza y arroja un valor constante.

Las pruebas experimentales se sometieron a un análisis estadístico que conlleva el cálculo del promedio y la desviación estándar. Se pueden observar los valores numéricos de este tratamiento en el Anexo A.1. Como resultado de este análisis se obtuvo el comportamiento de la presión promedio respecto como se muestra en la Figura 5.5.

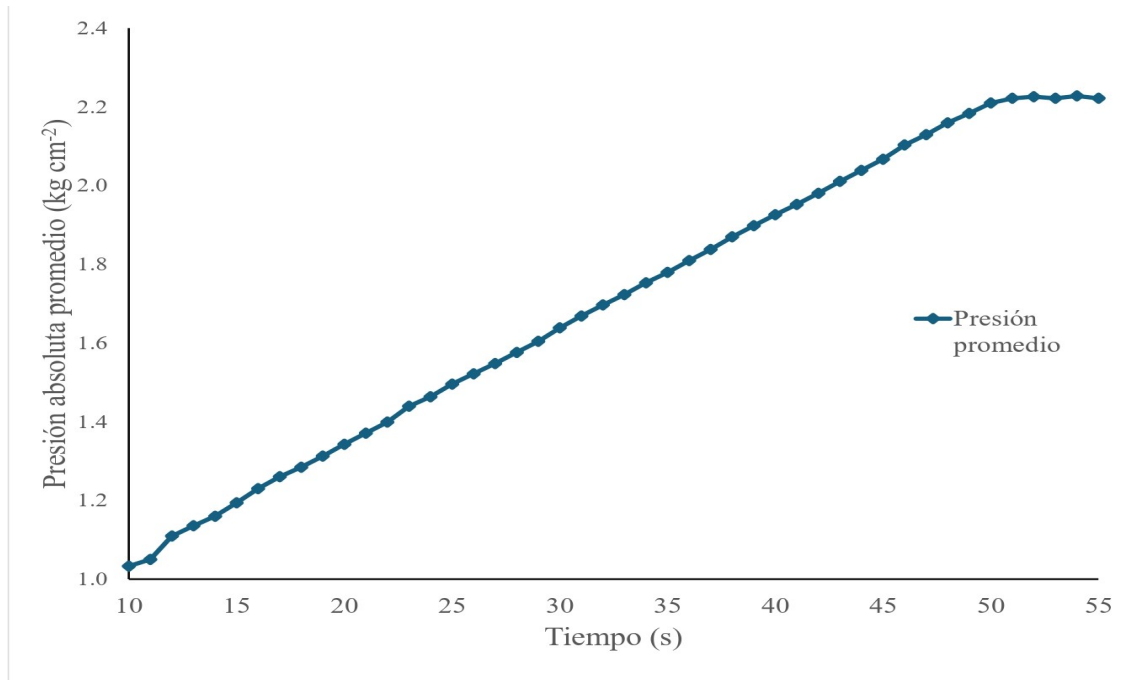


Figura 5.5: Comportamiento presión absoluta de descarga

Se puede observar que la presión presenta un comportamiento lineal creciente respecto del tiempo, presentando un punto máximo a una presión de  $2.2 \frac{kg}{cm^2}$ .

La gráfica inicia a los 10 s dado que es en ese instante en que el sensor detecta la señal de la presión, esto debido a que el gas se demora ese tiempo en vencer la presión hidrostática que genera el agua en el tanque burbujeador. Después de los 50 s la presión se estabiliza y se mantiene constante, por lo que se omiten los datos constantes en la gráfica de presión promedio.

Como se observa un comportamiento lineal, se realizó la regresión lineal de los datos y se determinó la variabilidad de los datos con un análisis ANOVA (Mendenhall et al., 2010). El Anexo A.1 muestra los estadísticos de el análisis así como su respectiva interpretación. Continuando con la regresión lineal, la Figura 5.6 muestra el resultado de esta, así como se muestra la ecuación de la curva que mejor se ajusta a la regresión:

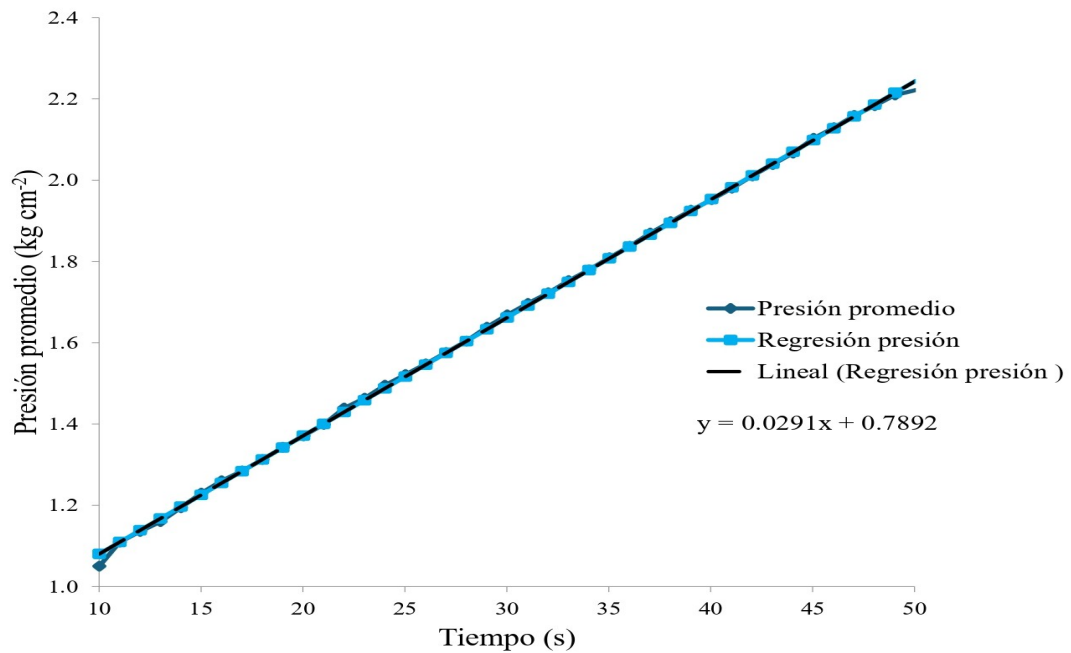


Figura 5.6: Regresión lineal presión de descarga

En la Tabla 5.3 muestra la medida de los estadísticos de la regresión.

Tabla 5.3: Estadísticos de regresión de presión de descarga

Coefficiente de correlación múltiple ( $R$ )	0.999
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.999
Error típico	0.007
Observaciones	41

El valor numérico del coeficiente correlación múltiple indica una buena correlación positiva entre las variables. Para el coeficiente de determinación indica que el 97 % de los datos son explicados de manera correcta por la regresión lineal, además de tener un error bajo en la regresión de los datos siendo este de menos del 1 % de los 41 datos que se utilizaron.

### 5.1.2.2 Operación normal estable

Para las pruebas de operación normal estable y descarga superior a la producción se operó la válvula del quemador atmosférico a diferentes ángulos de apertura, durante estas pruebas se determinó que para los ángulos de entre  $10^\circ - 30^\circ$  sexagesimales el cambio en la presión de descarga es tan pequeño que se considera despreciable. A partir de un ángulo de apertura de  $40^\circ$  el cambio en la presión tiene relevancia en el sistema.

La Figura 5.7 muestra de manera gráfica los datos que se obtuvieron de cada una de las pruebas realizadas.

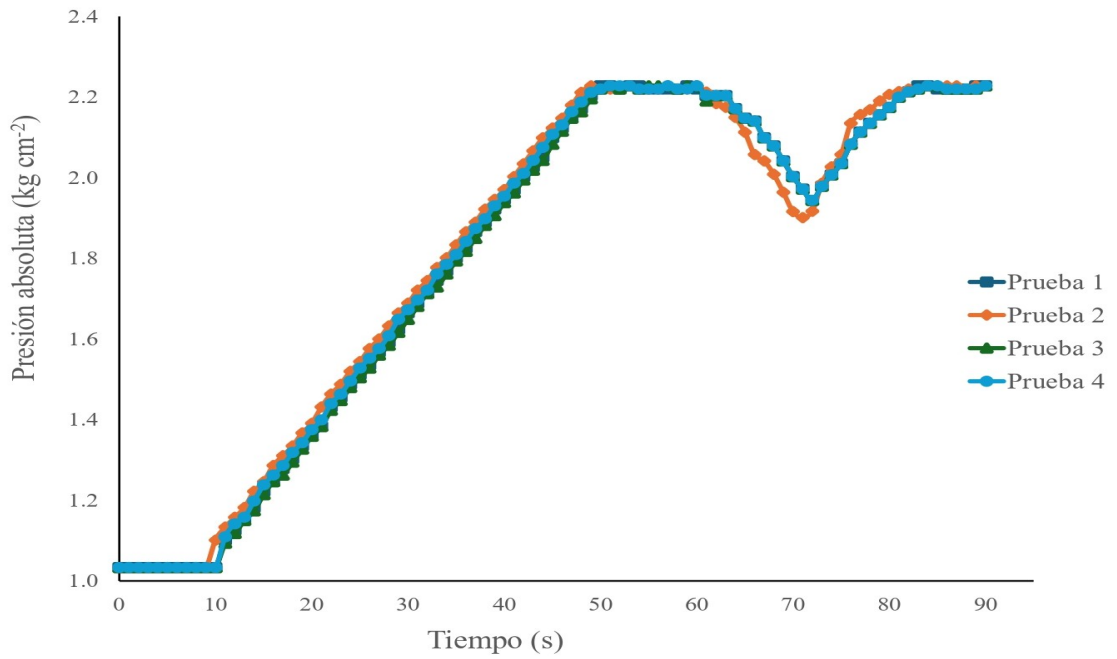


Figura 5.7: Comportamiento presión absoluta de descarga apertura 40°

Para un mejor análisis de comportamiento se obtuvo el promedio de la evolución de la presión respecto del tiempo, el Anexo A.1 presenta los datos referentes de promedio y desviación estándar, mientras que la Figura 5.8 muestra de manera gráfica el comportamiento de la presión:

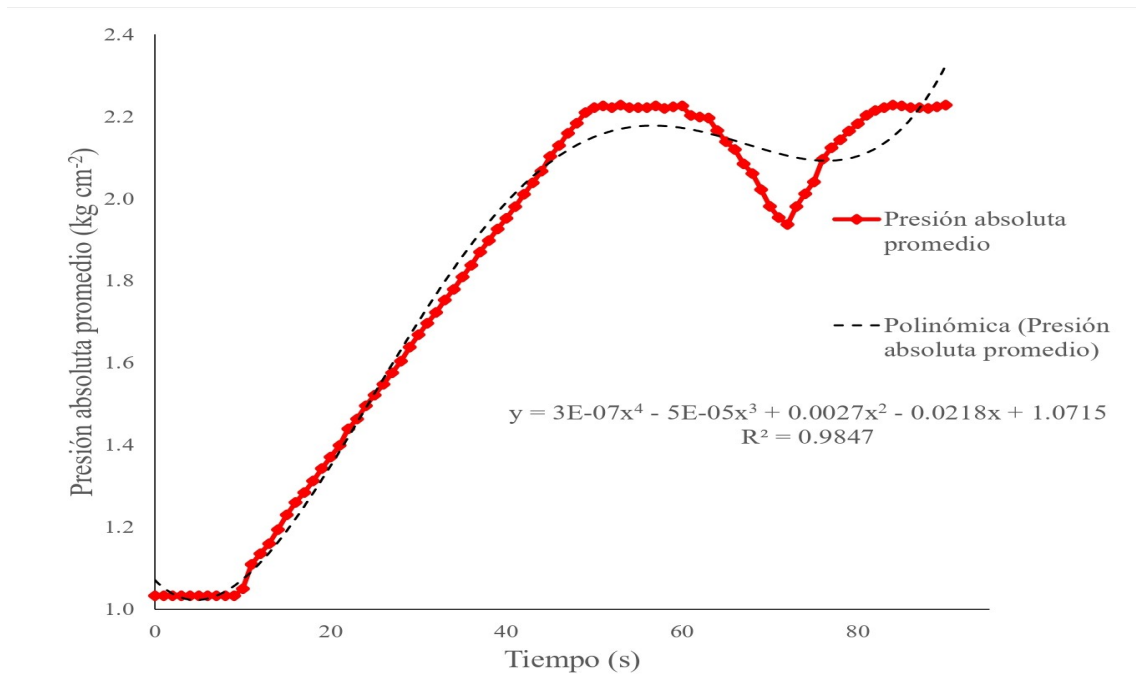


Figura 5.8: Comportamiento presión absoluta de descarga promedio apertura 40°

La primera parte de la gráfica resulta en el mismo comportamiento de la sección anterior, a partir del primer punto de inflexión, que es el equivalente al momento en que se abre la válvula del quemador atmosférico se observa una disminución en la presión, es decir, el gas está abandonando la línea, el segundo punto de inflexión, referente al mínimo relativo donde el sistema comienza la producción de gas, llenando la línea de este y como consecuencia la presión aumenta. Este comportamiento es cíclico conforme el tiempo avanza, teniendo un mínimo relativo en  $1.937 \frac{kg}{cm^2}$ .

### 5.1.2.3 Descarga superior a la producción

Para esta sección se observó que el comportamiento inicia a los  $50^\circ$  de apertura y resulta el mismo para ángulos superiores, por lo que se toma como base el ángulo inicial de  $50^\circ$ , las pruebas realizadas se reportan en la Figura 5.9

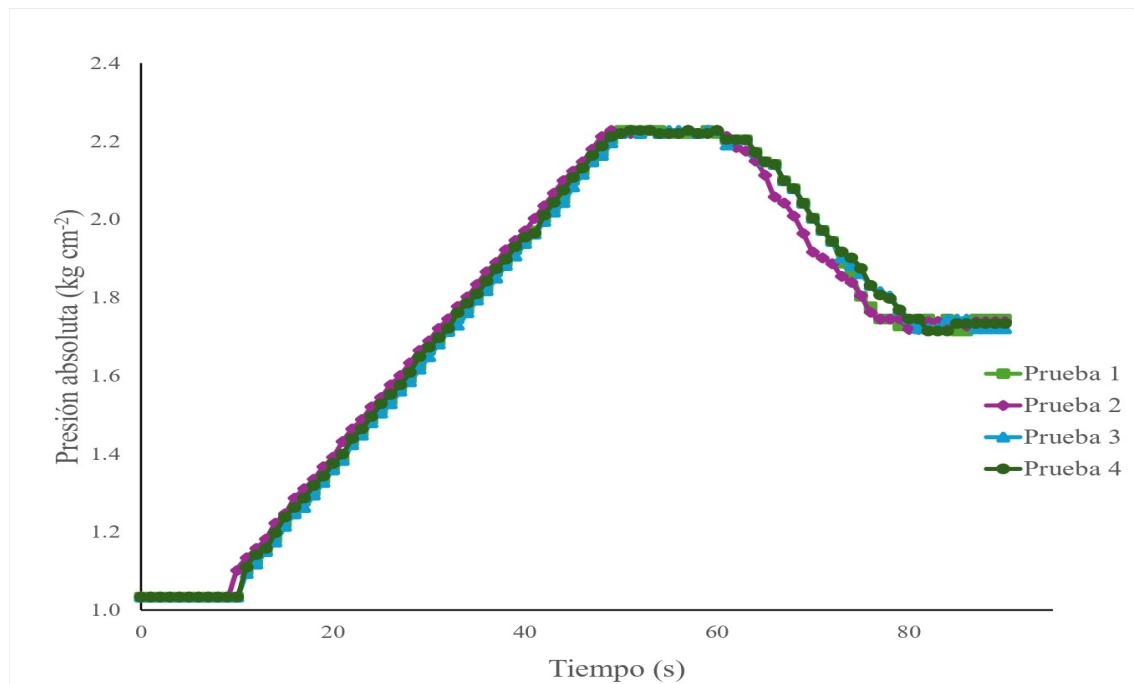


Figura 5.9: Comportamiento presión absoluta de descarga apertura  $50^\circ$

Para tener un mejor análisis sobre el comportamiento de la presión se realizó la determinación del promedio y la desviación, los datos se reportan en el Anexo A.1. La Figura 5.10 muestra el comportamiento de la presión promedio respecto del tiempo.

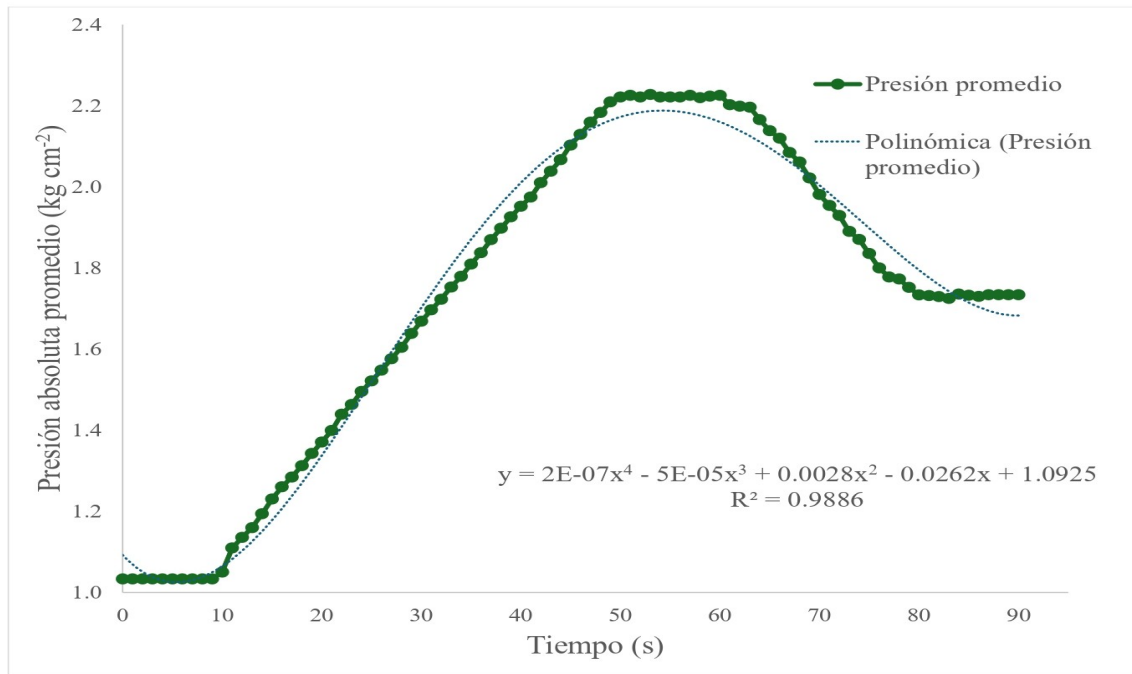


Figura 5.10: Comportamiento presión absoluta de descarga promedio apertura 50°

La primera parte corresponde, al igual que la sección anterior, al llenado del sistema con la producción del gas combustible, después de los 60 s se da la caída de la presión en el escenario que corresponde a la apertura de la válvula, solo que, al contrario de la sección anterior, la presión no se recupera al punto máximo, sino que se mantiene en un punto estable con el sistema realizando la producción del gas durante todo el tiempo en que la válvula permanece abierta.

Para finalizar con esta sección, la Tabla 5.4 muestra un resumen con los datos de la presión absoluta de descarga del sistema de reacción encontrados experimentalmente, en los que se engloban; la presión máxima, mínima, el intervalo de operación normal y el punto de descarga.

Tabla 5.4: Valores experimentales presión de descarga

Presión absoluta mínima ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	1.033
Presión absoluta máxima ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	2.226
Presión absoluta de operación estable ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	[1.198, 2.226]
Presión absoluta de descarga superior ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	1.734

### 5.1.3 Flujo volumétrico

Para comenzar con la caracterización del flujo volumétrico se acopló el flujómetro por medio de una línea de tubería de 0.05 m, la Figura 5.11 muestra el acople del flujómetro al sistema de reacción.



Figura 5.11: Sistema experimental flujo volumétrico

#### 5.1.3.1 Arranque del equipo

Durante las pruebas de flujo de gas combustible de descarga se acopló al sistema el quemador atmosférico, manteniéndolo cerrado en todo momento, mientras que la válvula que viene ya acoplada al sistema se mantenía abierta, dejando pasar así el gas con lo cual se podía observar cómo se elevaba la esfera del flujómetro por el paso del gas.

La toma de datos de la lectura del flujómetro se realizó mediante la toma de evidencia audiovisual, la Figura 5.12 presenta los datos de cada una de las pruebas.

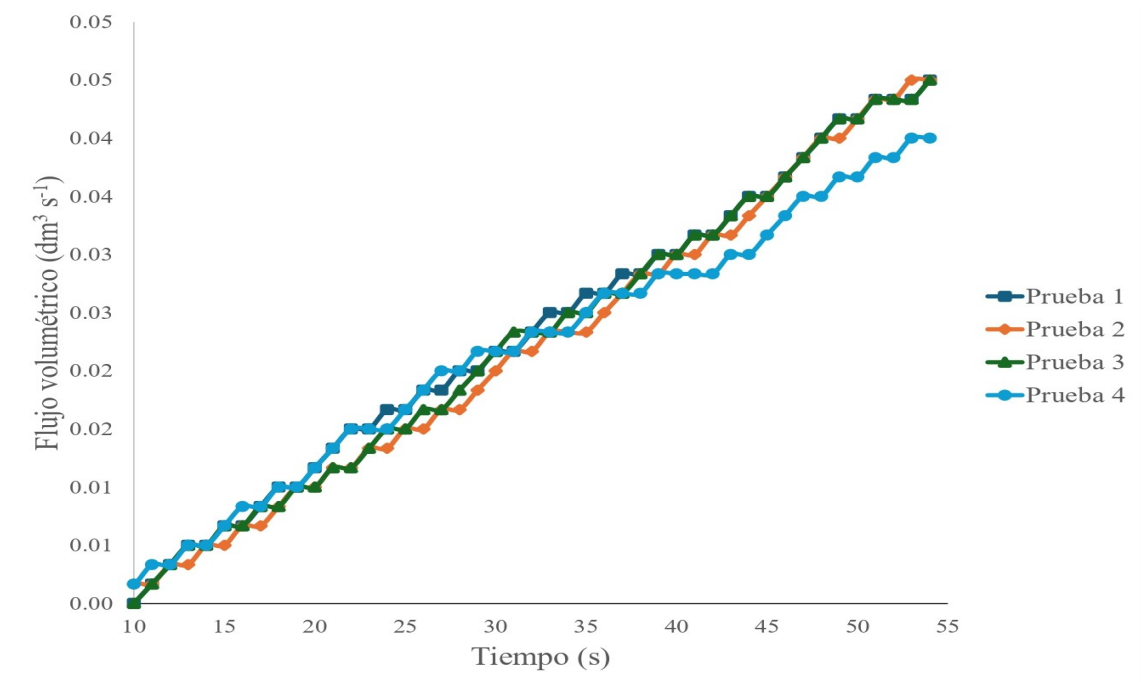


Figura 5.12: Comportamiento flujo volumétrico de descarga

Como se mencionó en la sección anterior, durante los primeros diez segundos el gas debe pasar por el tanque burbujeador, por lo que se omiten los datos nulos en la gráfica, para una mejor apreciación del comportamiento se determinó el promedio del flujo volumétrico, estos se visualizan en el Anexo A.2. El comportamiento promedio se muestra en la Figura 5.13

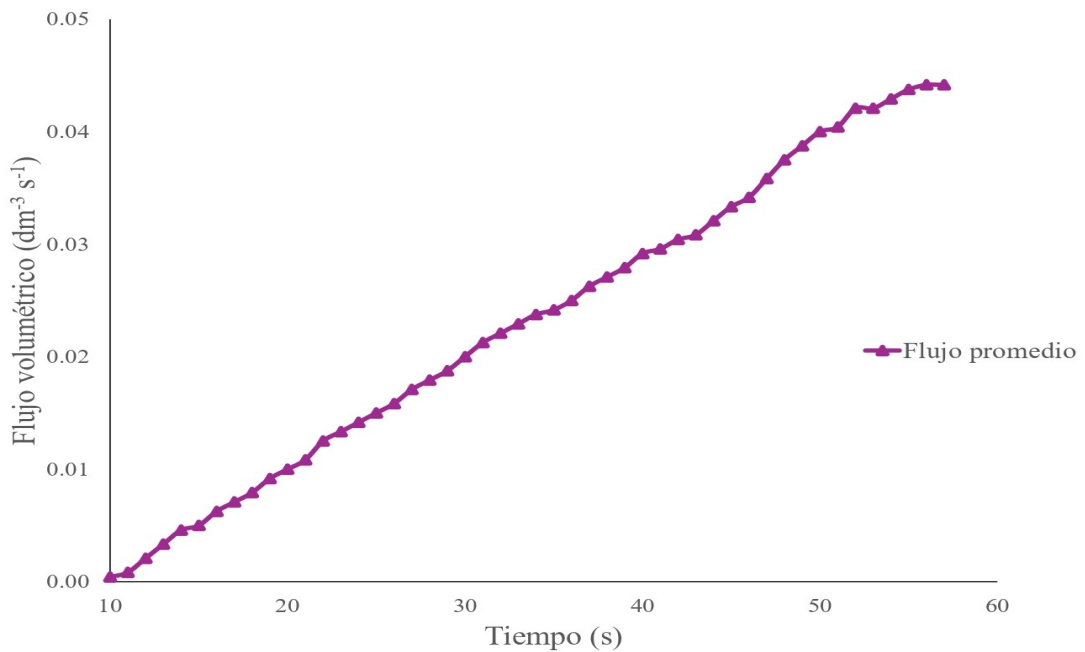


Figura 5.13: Comportamiento flujo volumétrico promedio de descarga

Se observa una tendencia lineal creciente conforme avanza el tiempo, la línea de gas se va llenando de gas combustible haciendo que aumente la presión en la misma, como se observó en la sección anterior. De el mismo modo, se realizó una regresión lineal para obtener una aproximación del comportamiento, la Figura 5.14 muestra la gráfica de la regresión.

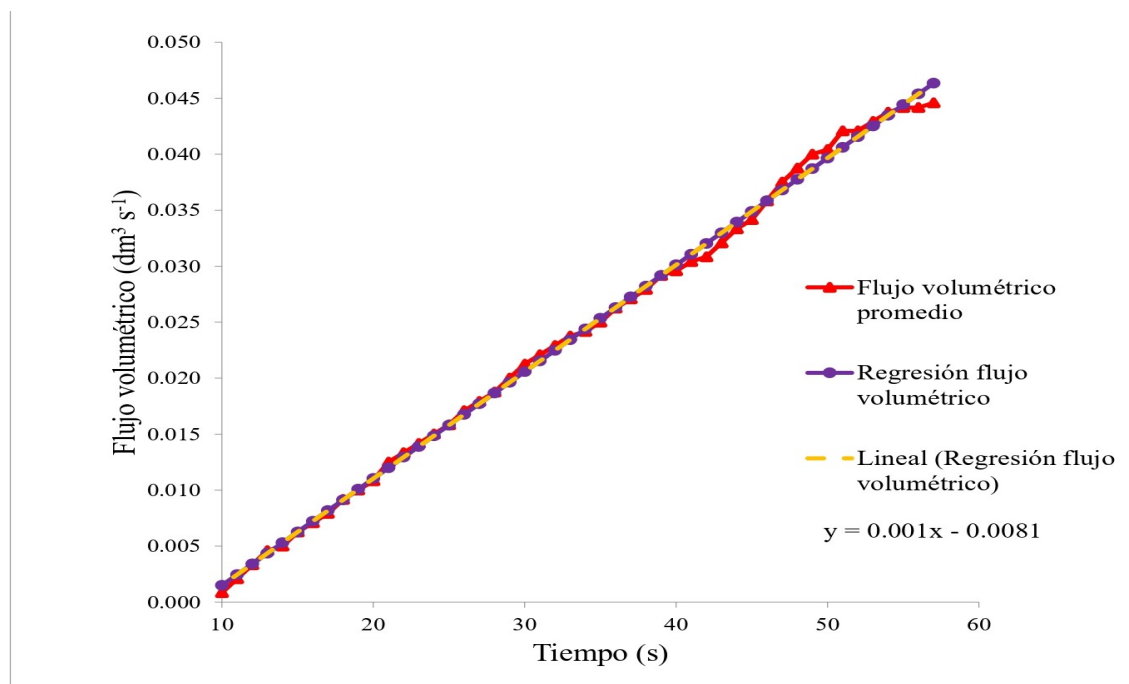


Figura 5.14: Regresión lineal flujo volumétrico

El análisis de las medidas estadísticas de la regresión se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Estadísticos de regresión flujo volumétrico

Coefficiente de correlación múltiple ( $R$ )	0.999
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.998
Error típico	0.0006
Observaciones	49

La correlación de los datos es bastante aceptable, teniendo un valor alto para los coeficientes de correlación y determinación, así mismo, se tiene un comportamiento de linealidad creciente, el Anexo A.2 presenta el análisis *ANOVA*, dando una mayor confiabilidad de los datos.

### 5.1.3.2 Operación normal estable

Para esta sección se tomó el mismo ángulo de apertura de  $40^\circ$  que el caso de presión, el comportamiento de las diversas pruebas se reporta en la Figura 5.15

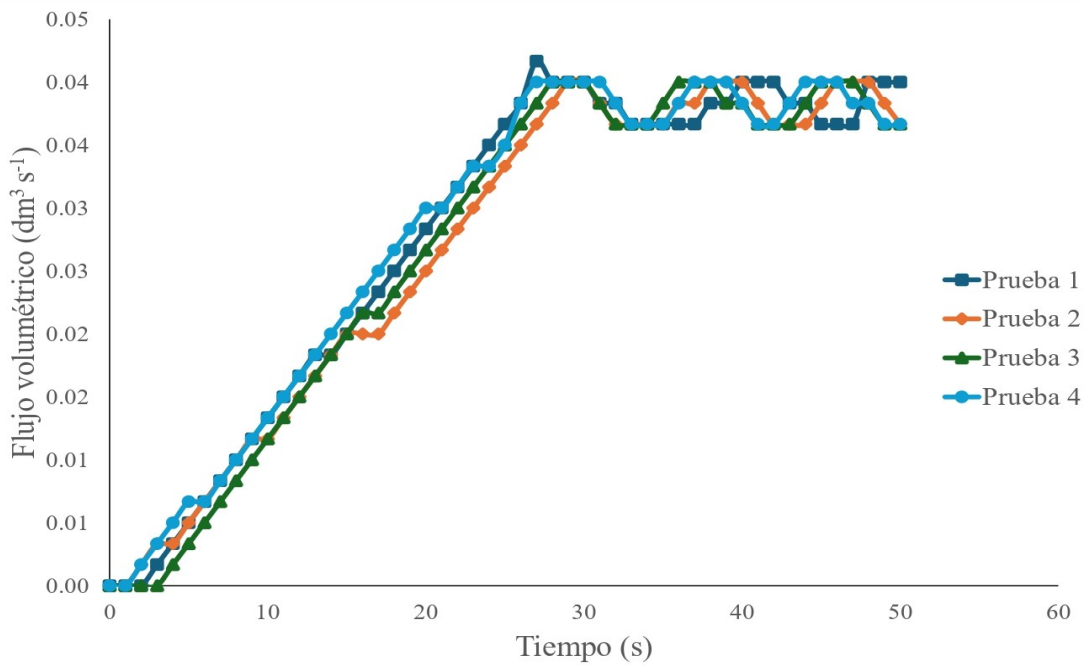


Figura 5.15: Comportamiento flujo volumétrico de descarga apertura de 40°

Para una mejor interpretación de los datos se calcula el promedio de los datos de cada una de las pruebas, los datos promedio, así como su respectiva desviación estándar se reportan en el anexo A.2.

El comportamiento promedio respecto del tiempo de esta prueba se reporta en la Figura 5.16

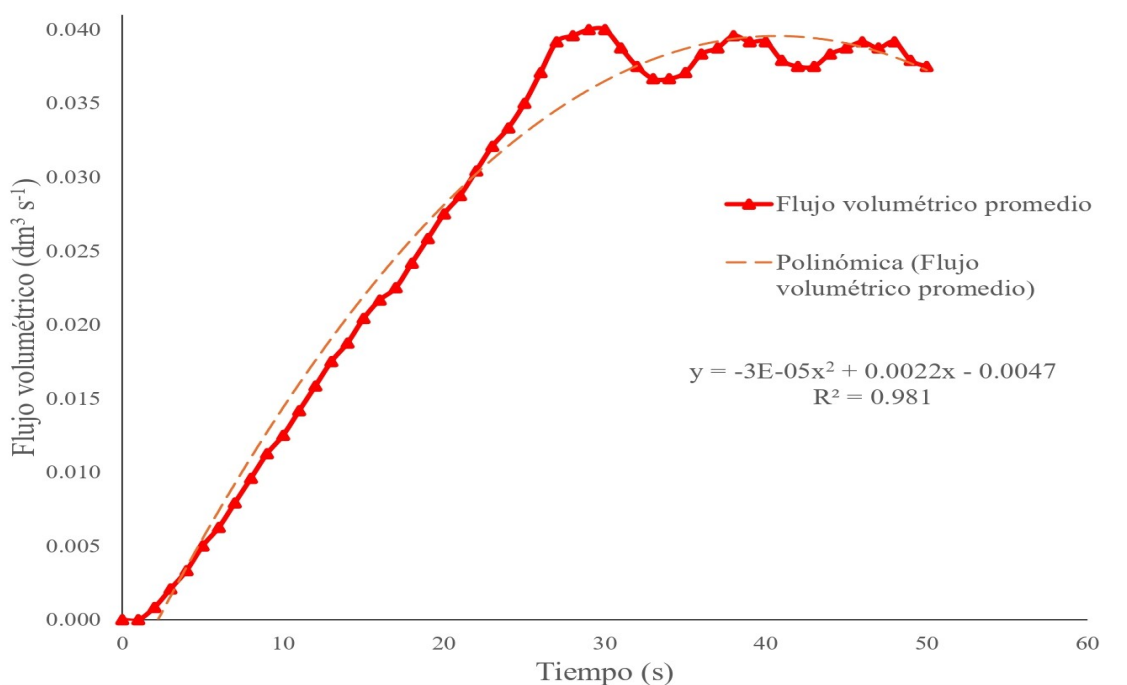


Figura 5.16: Comportamiento flujo volumétrico de descarga promedio apertura de 40°

Se observa un comportamiento similar al de la presión de descarga en el mismo ángulo de apertura. El flujo volumétrico presenta un comportamiento cíclico pasado el primer punto de inflexión de la gráfica, es decir, al momento de realizar la apertura de la válvula. El flujo descende y luego vuelve a subir, sin embargo, las oscilaciones se mantienen por debajo del flujo máximo de operación.

### 5.1.3.3 Descarga superior a la producción

Las pruebas de esta sección también se realizaron a un ángulo de apertura de  $50^\circ$  y se reportan en la Figura 5.17

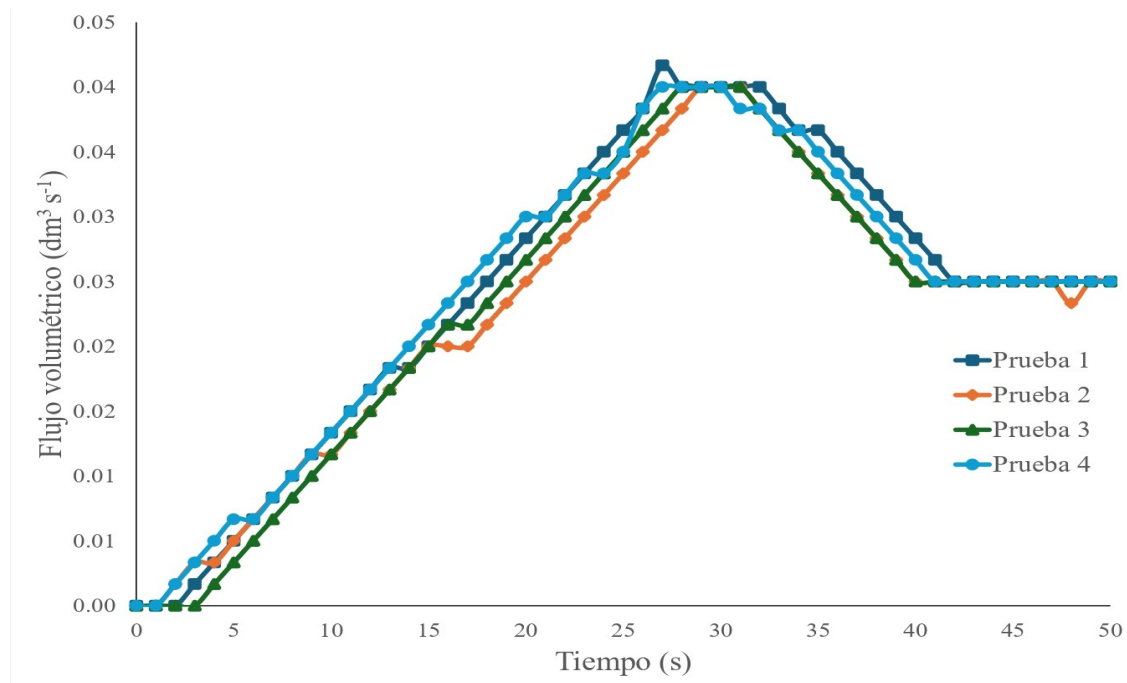


Figura 5.17: Comportamiento flujo volumétrico de descarga apertura de  $50^\circ$

La determinación de los datos promedios y la desviación estándar se reportan en el Anexo A.2 y la Figura 5.18 muestra el comportamiento promedio de esta prueba respecto del tiempo.

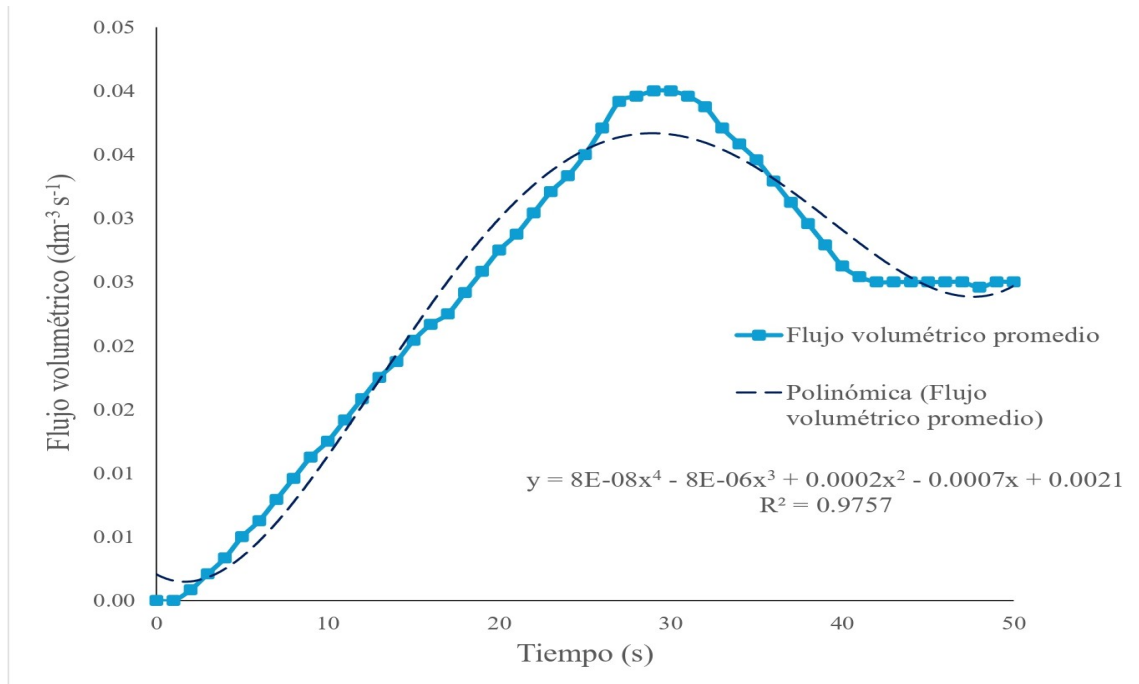


Figura 5.18: Comportamiento flujo volumétrico de descarga promedio apertura de  $50^\circ$

Se observa el mismo comportamiento que en el caso de la presión de descarga, la primera parte se llega al punto máximo de operación y comienza una disminución y no recuperación de flujo, quedándose el sistema produciendo gas mientras el flujo se estabiliza en un punto.

La Tabla 5.6 muestra un resumen de los valores experimentales que engloban; el flujo mínimo, el flujo máximo, el intervalo de flujo estable y el punto de no recuperación encontrados experimentalmente.

Tabla 5.6: Valores experimentales flujo volumétrico

Flujo volumétrico mínimo ( $\frac{\text{dm}^3}{\text{s}}$ )	0
Flujo volumétrico máximo ( $\frac{\text{dm}^3}{\text{s}}$ )	0.045
Flujo volumétrico de operación estable ( $\frac{\text{dm}^3}{\text{s}}$ )	[0.036, 0.04]
Flujo volumétrico de descarga superior ( $\frac{\text{dm}^3}{\text{s}}$ )	0.025

### 5.1.4 Composición

La composición del gas combustible  $HHO$  es presentada por la estequiometría de la reacción (ecuación (1.3)). Basado en la estequiometría se determinó las proporciones en unidades de  $\frac{\text{gr}}{\text{mol}}$  las cuales se presentan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Cantidad de masa de componentes de mezcla

Masa molar $H_2$ ( $\frac{gr}{mol}$ )	2.016
Fración masa $H_2$	0.559
Masa molar $O_2$ ( $\frac{gr}{mol}$ )	31.998
Fración masa $O_2$	0.881
Masa mezcla $HHO$ ( $\frac{gr}{mol}$ )	36.031

Para realizar la conversión de unidades se realizó la determinación de la densidad de  $HHO$ , el Anexo A.3 muestra los datos de densidad asociados a los diferentes datos de presión que se obtuvieron en las pruebas referentes a esta variable, de manera particular, la presión máxima de operación.

Tomando como base de cálculo la presión y el flujo volumétrico máximos se realizó el cálculo del caudal másico y molar asociados con el flujo volumétrico de gas combustible, los resultados de estos cálculos se reportan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Descomposición en componentes flujo de gas

Densidad ( $\frac{gr}{dm^3}$ )	3.139
Flujo volumétrico ( $\frac{dm^3}{s}$ )	0.045
Flujo másico mezcla ( $\frac{gr}{s}$ )	0.141
Flujo másico $H_2$ ( $\frac{gr}{s}$ )	0.078
Flujo másico $O_2$ ( $\frac{gr}{s}$ )	0.124
Flujo molar mezcla ( $\frac{mol}{s}$ )	0.004
Flujo molar $H_2$ ( $\frac{mol}{s}$ )	0.0026
Flujo molar $O_2$ ( $\frac{mol}{s}$ )	0.0013

## 5.1.5 Velocidad de fluido compresible

### 5.1.5.1 Arranque del equipo

Como se mencionó en la descripción metodológica de ese parámetro, se tomó como base de cálculo los datos obtenidos experimentalmente de flujo volumétrico para cada uno de los tratamientos realizados a la variable, la Figura 5.19 muestra la velocidad en la operación de vacío a máximo flujo de cada una de las pruebas realizadas.

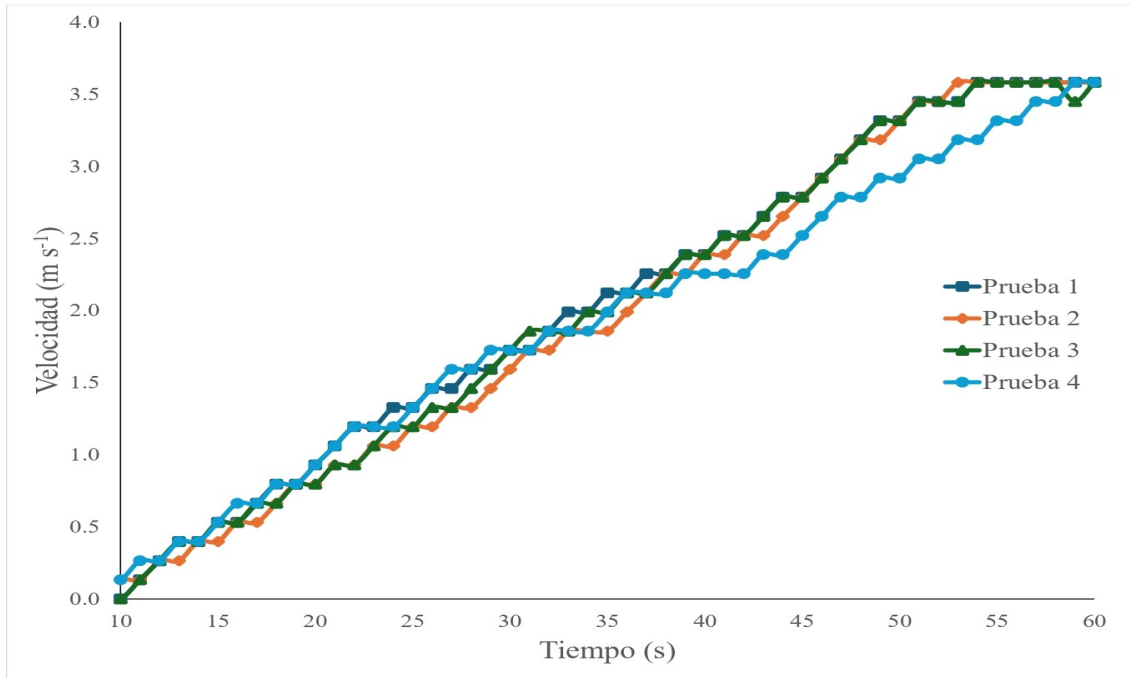


Figura 5.19: Comportamiento velocidad de flujo de descarga

La velocidad presenta un comportamiento esperado dada su dependencia al flujo volumétrico, para apreciar mejor el comportamiento lineal se determinó el promedio de la velocidad, la cual se reporta en la Figura 5.20.

El Anexo A.4 muestra la tabla de datos de velocidad promedio con su respectiva desviación estándar.

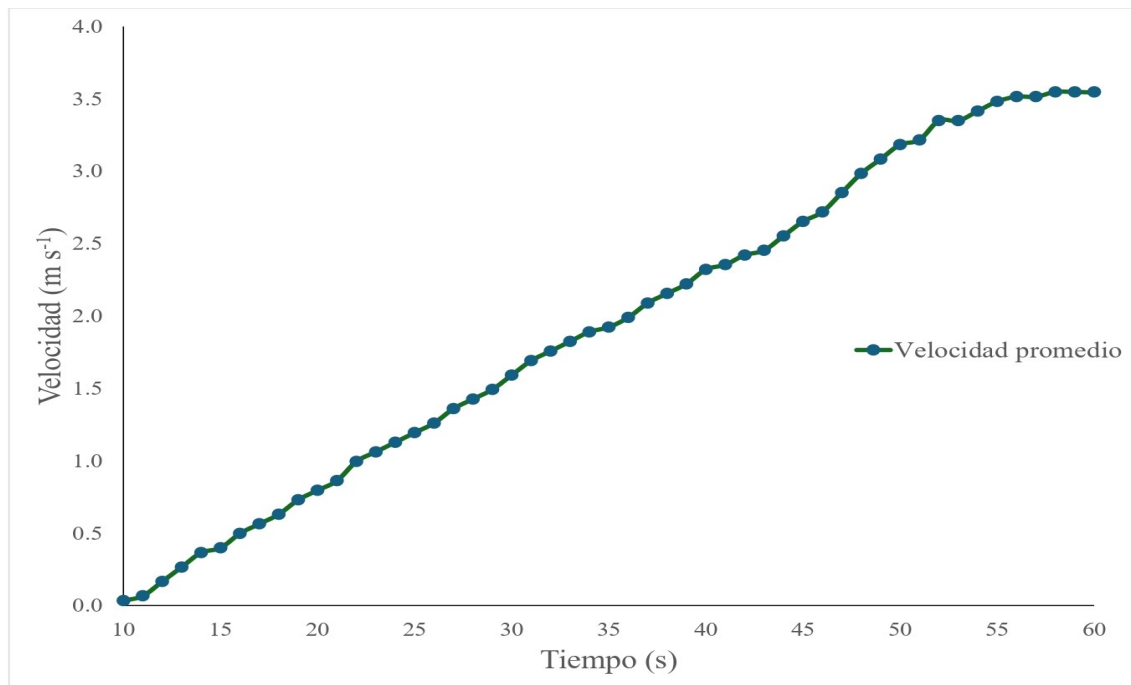


Figura 5.20: Comportamiento velocidad de flujo de descarga

El comportamiento obedece la linealidad creciente esperada por la dependencia explícita sobre el flujo volumétrico e implícita de la presión. La Figura 5.21 muestra el resultado de la regresión lineal que se le aplicó a la variable, así como en el Anexo A.4, se muestra el análisis ANOVA.

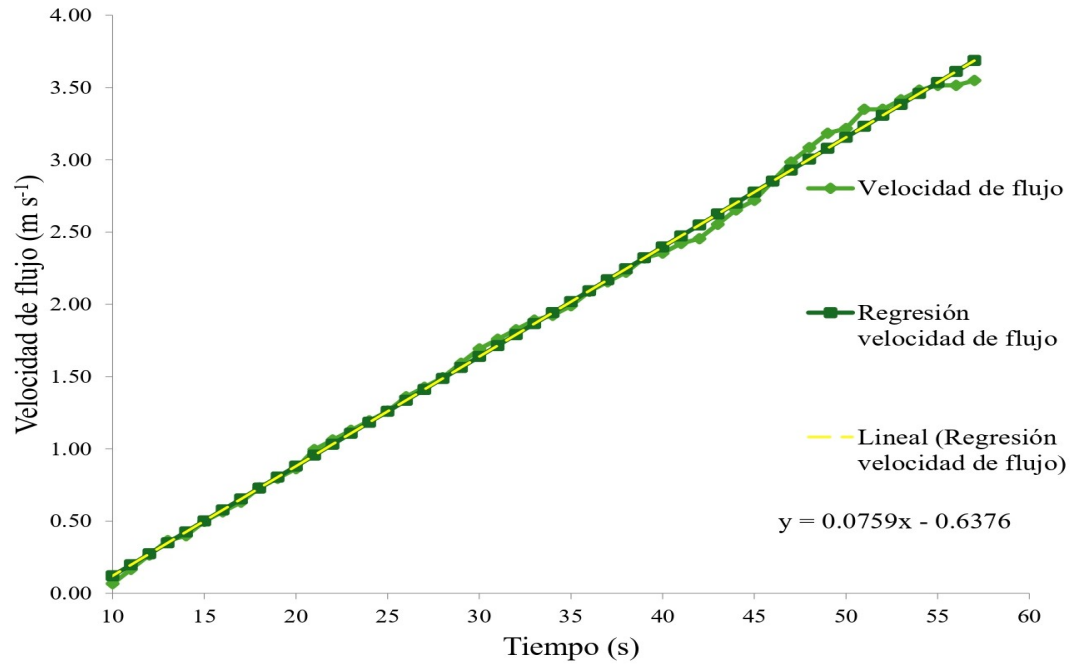


Figura 5.21: Regresión lineal velocidad de flujo

Se puede observar una buena aproximación de la regresión con los datos calculados, esta afirmación se puede sustentar con los valores numéricos de los coeficientes de correlación y determinación presentados en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Estadísticos de regresión velocidad de flujo

Coefficiente de correlación múltiple ( $R$ )	0.999
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.998
Error típico	0.0488
Observaciones	50

### 5.1.5.2 Operación normal estable

Continuando con los resultados de los cálculos de la velocidad de flujo, la Figura 5.22 muestra el comportamiento respecto del tiempo de la velocidad de flujo con una apertura de válvula de 40°.

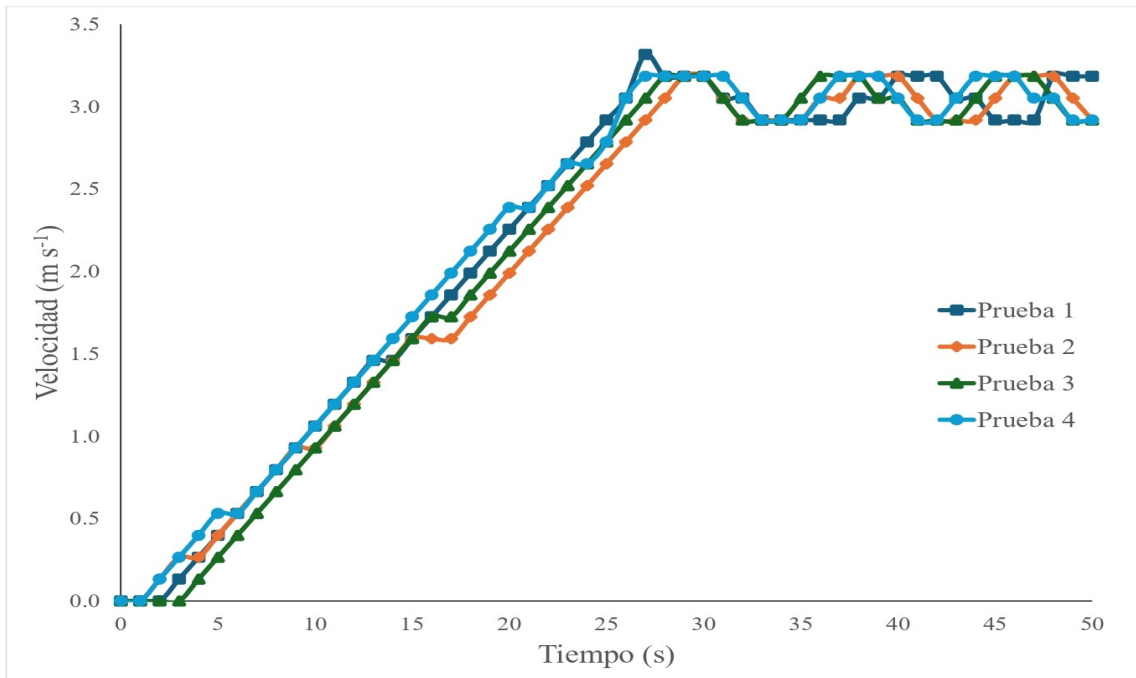


Figura 5.22: Comportamiento velocidad de flujo apertura de 40°

Se puede observar el comportamiento cíclico ya reportado en las dos variables anteriormente analizadas, para una mejor visualización se graficó el comportamiento promedio respecto del tiempo, dicho gráfico se muestra en la Figura 5.23, mientras que el cálculo del promedio y la desviación estándar se muestran en el Anexo A.4

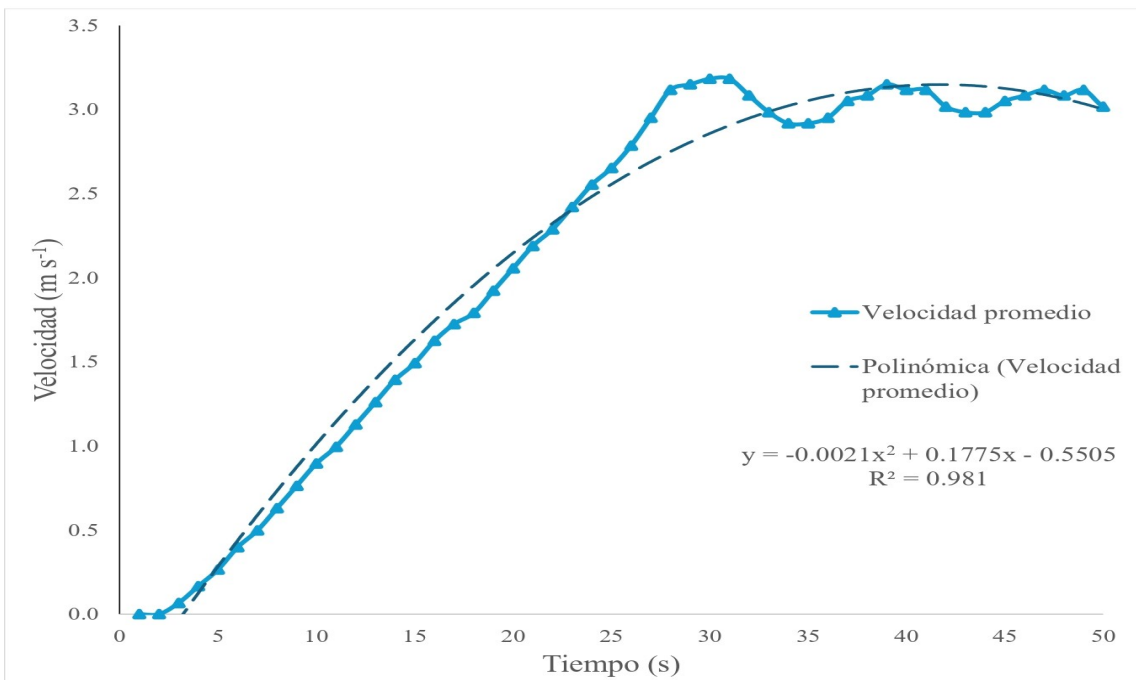


Figura 5.23: Comportamiento velocidad de flujo promedio apertura de 40°

El comportamiento tiene una mayor relación al comportamiento cíclico del flujo, dado que se mantiene por debajo de la velocidad máxima de flujo, entrando en un ciclo de producción y consumo de gas combustible.

### 5.1.5.3 Descarga superior a la producción

Para finalizar este apartado, se muestran los resultados de los cálculos de la velocidad de flujo, la Figura 5.24 muestra el comportamiento respecto del tiempo de la velocidad de flujo con una apertura de válvula de  $50^\circ$ .

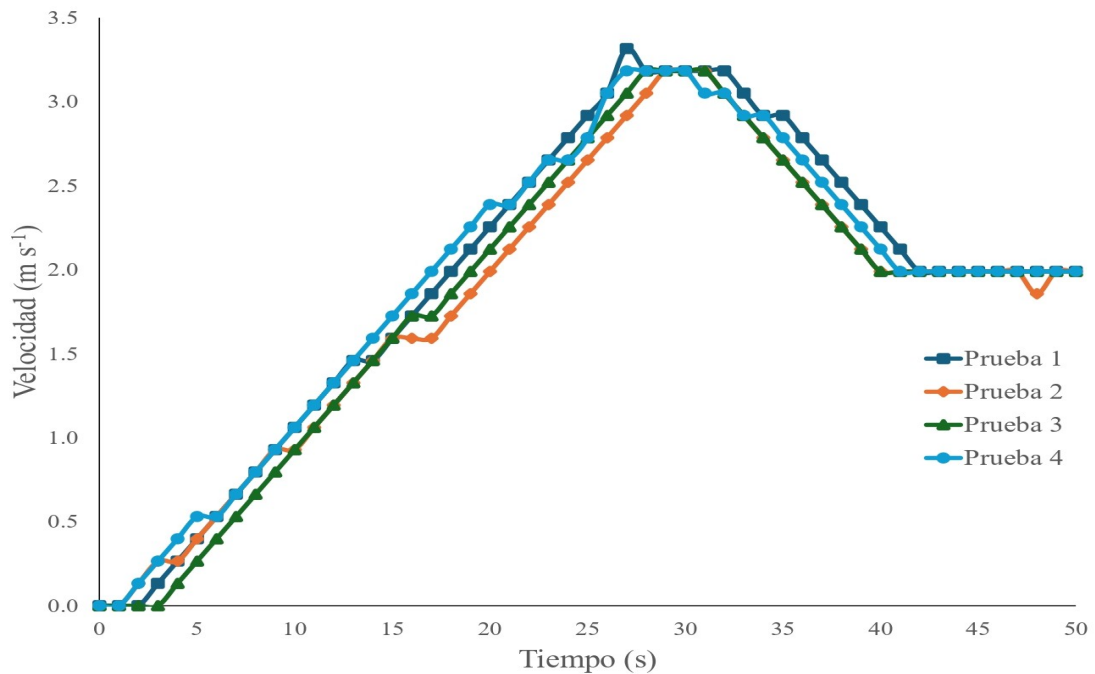


Figura 5.24: Comportamiento velocidad de flujo apertura de  $50^\circ$

Para una mejor visualización de los datos se reporta el comportamiento promedio de la velocidad en la Figura 5.25 y en el Anexo A.4 se muestran los datos con su desviación estándar.

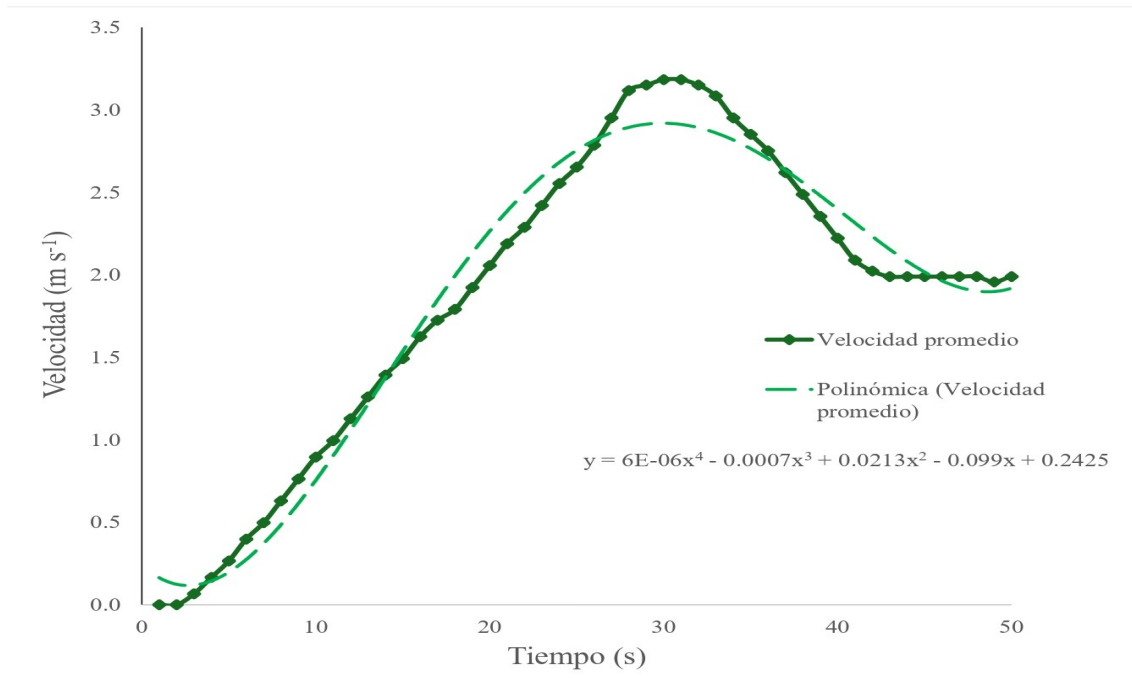


Figura 5.25: Comportamiento velocidad de flujo apertura de 50°

El comportamiento de la variable de velocidad continua con la tendencia de ambas variables anteriores al mismo ángulo de apertura de la válvula del quemador atmosférico. Se observa que la velocidad, después del punto de inflexión hay una disminución de la magnitud de la velocidad, una vez que la velocidad cae no se repone a su punto máximo indicando que el sistema está produciendo menos gas del que se está consumiendo.

La Tabla 5.10 muestra un resumen de los valores de velocidad calculados para cada uno de los tratamientos que se realizaron.

Tabla 5.10: Valores calculados de velocidad media de fluido compresible

Velocidad media mínima ( $\frac{m}{s}$ )	0
Velocidad media máxima ( $\frac{m}{s}$ )	3.58
Velocidad media de operación estable ( $\frac{m}{s}$ )	[2.91, 3.58]
Velocidad media de descarga superior ( $\frac{m}{s}$ )	1.989

### 5.1.6 Temperatura

Para finalizar el proceso de caracterización se realizó la programación del sensor de temperatura y su acople al sistema de reacción, este acople se muestra dentro del círculo rojo de la Figura 5.26.

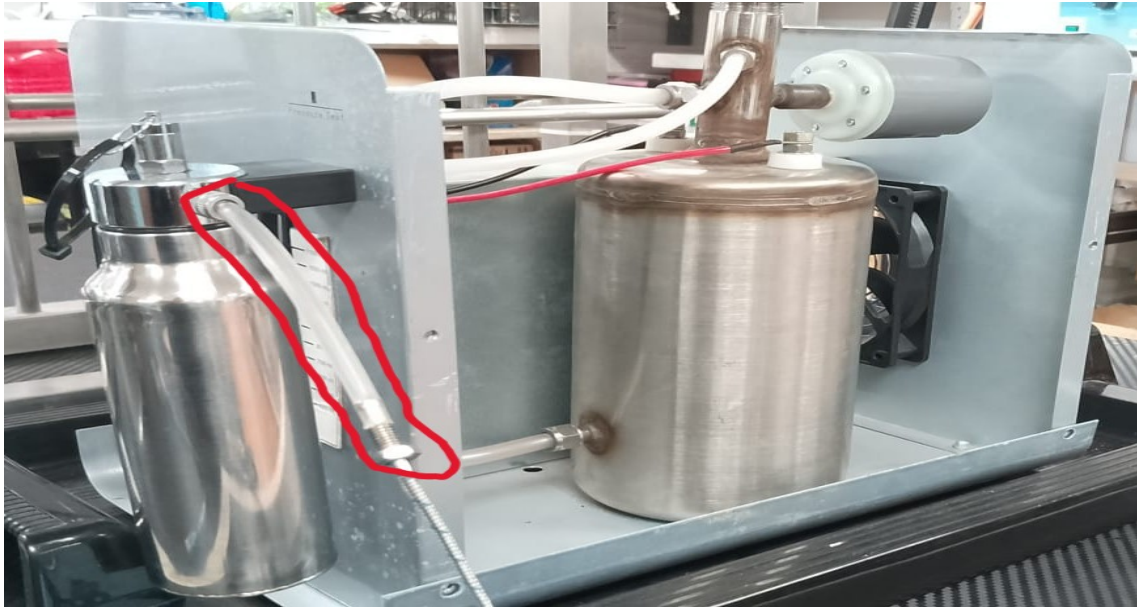


Figura 5.26: Arreglo experimental pruebas temperatura

La toma de datos se realizó en un rango de tiempo de un minuto, después de la realización de las cuatro pruebas experimentales se realizó el cálculo de la temperatura promedio y la desviación estándar, datos mostrados en el Anexo A.5.

Los datos de la variación promedio de la temperatura respecto del tiempo se muestran en la Figura 5.27.

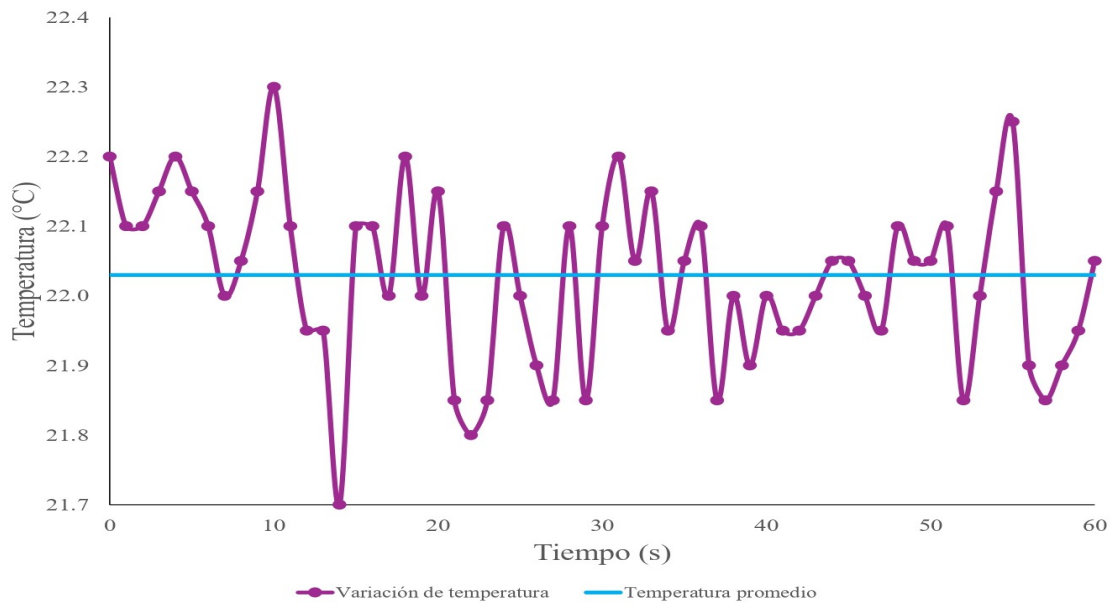


Figura 5.27: Comportamiento de la temperatura respecto del tiempo

En la gráfica se muestra que la temperatura no tiene un comportamiento como en el caso de las variables anteriores, manteniéndose variando dentro de un intervalo.

Este intervalo variación se da entre  $[21.7^{\circ}C, 22.3^{\circ}C]$

El delta de esta variación es de  $\pm 0.6^{\circ}C$ , un rango pequeño tal que se puede considerar como la temperatura constante, además de mantenerse por debajo del rango de error que tiene el sensor tipo K de acuerdo con su ficha técnica, siendo este valor de  $\pm 1.5^{\circ}C$ . Se obtuvo un valor promedio de la temperatura para tener un valor constante al momento de realizar la integración del modelo del entorno experimental.

Por lo que se determinó una temperatura constante de  $22.3^{\circ}C \pm 0.6$

---

## Sección 5.2.

---

### *Objetivo 2*

---

#### 5.2.1 Relación flujo-presión

De manera inicial para las pruebas realizadas en esta sección, se realizó la construcción de la trampa de agua necesaria para la medición del desplazamiento volumétrico. La Figura 5.28 muestra el sistema experimental construido para la realización de las pruebas experimentales.

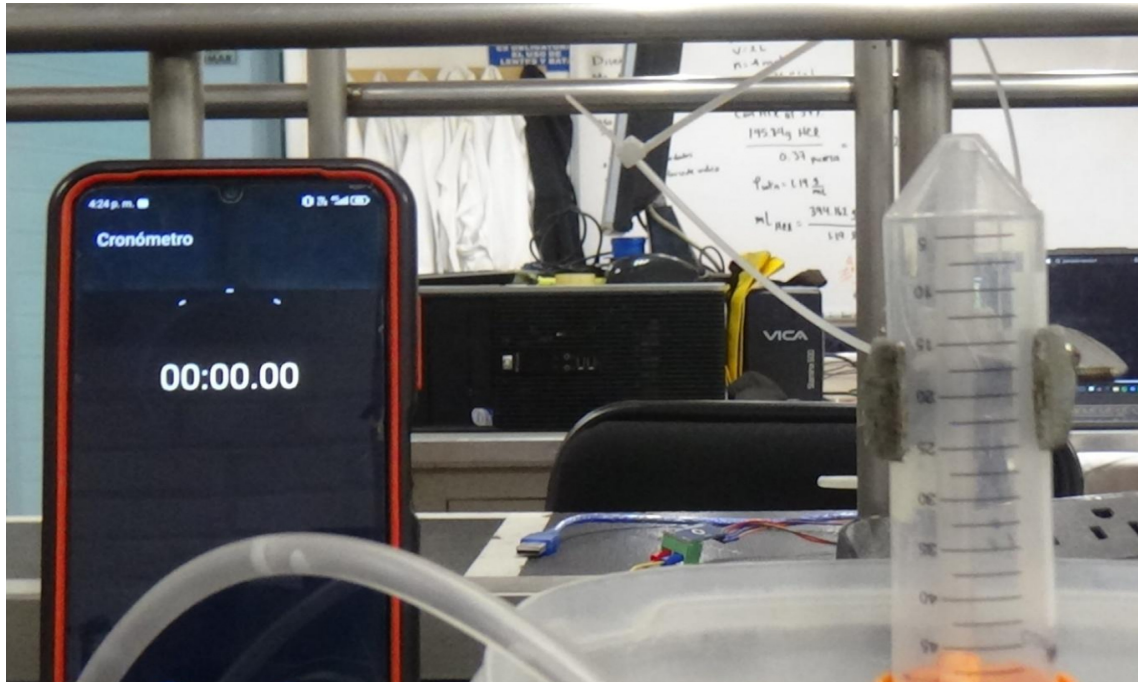


Figura 5.28: Sistema experimental flujo-presión

Se inició con las pruebas de desplazamiento a una apertura de  $40^{\circ}$ , una vez obtenida la información de cada una de las pruebas se realizó la estadística básica de los datos, reportados en el Anexo B.1.

Posteriormente se realizaron las pruebas a una apertura de  $50^\circ$ , realizando el mismo proceso de estadística básica, reportados en el Anexo B.1. Los resultados promedio referentes a las aperturas de  $40^\circ - 50^\circ$  se graficaron y se muestran en la Figura 5.29

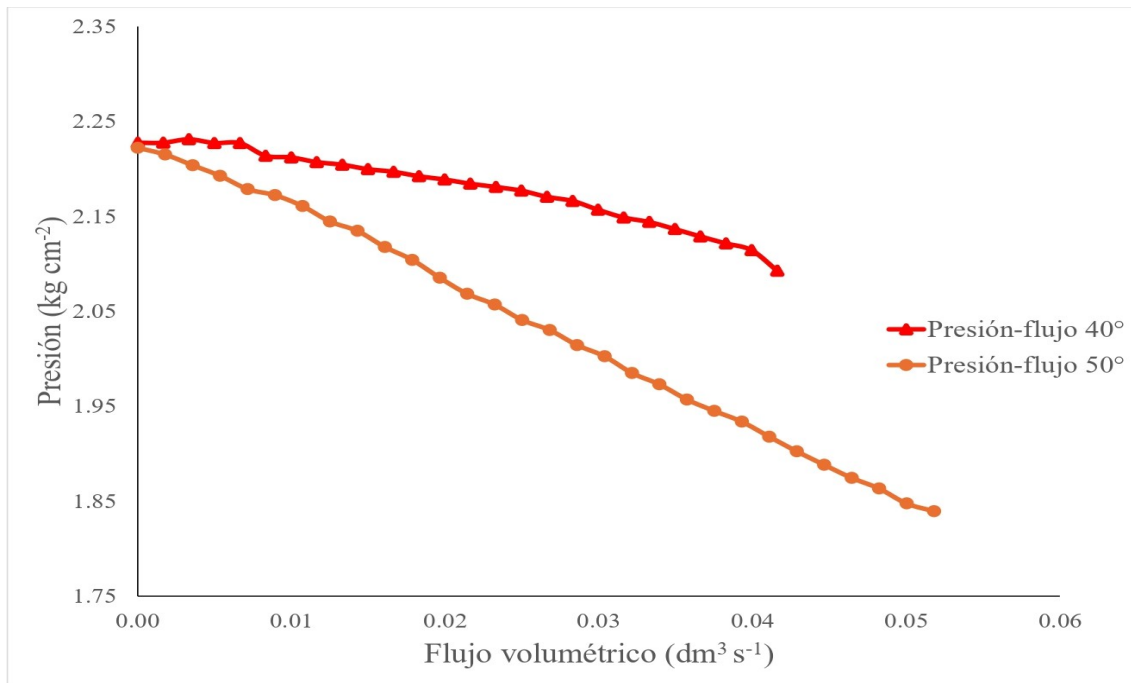


Figura 5.29: Desplazamiento volumétrico apertura de  $40^\circ - 50^\circ$

Se observa un comportamiento lineal con pendiente negativa conforme la presión va disminuyendo, así mismo conforme se da un aumento en la apertura de la válvula la magnitud de la pendiente aumenta desplazando más agua y a una mayor velocidad.

Se muestra que a los  $40^\circ$  la presión no muestra una disminución considerable, manteniéndose cerca de la presión máxima, a diferencia de la apertura de  $50^\circ$ , haciendo que una apertura de  $40^\circ$  sea un mejor ángulo para utilizar el gas producido.

Para ambos escenarios se realizó una regresión lineal de los datos, comenzando con la apertura de  $40^\circ$  la cual se muestra en la Figura 5.30, así mismo se realizó el análisis *ANOVA* que se muestra en el Anexo B.1.

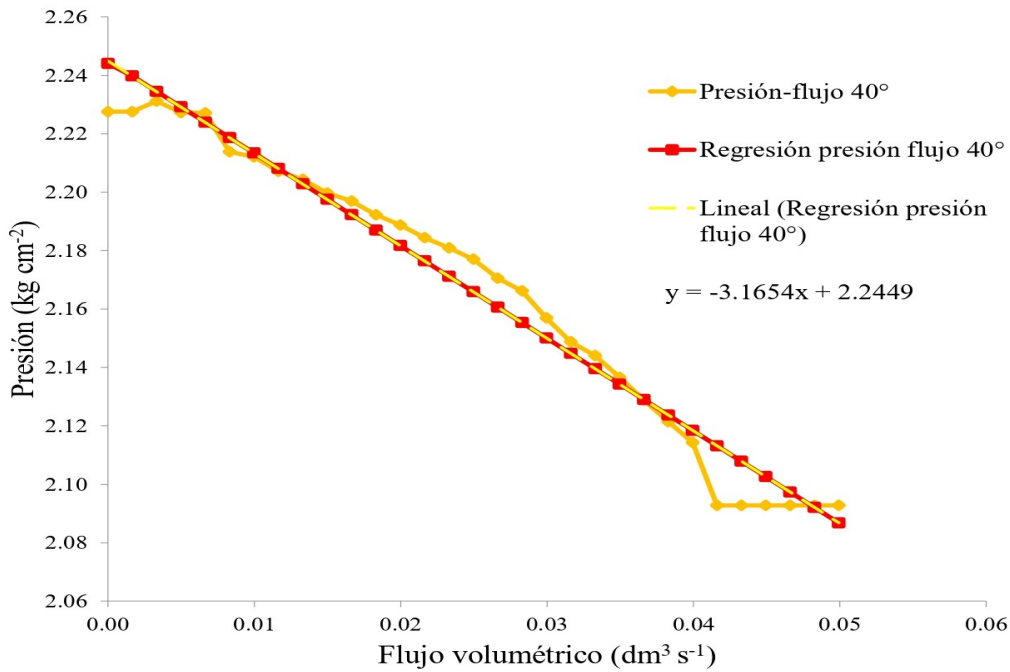


Figura 5.30: Regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 40°

Se muestra una dispersión leve en los datos en comparación con la regresión lineal, sin embargo, la regresión es aún bastante buena, esto se confirma con los valores de los estadísticos que se reportan en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Estadísticos regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 40°

Coefficiente de correlación múltiple ( $R$ )	0.986
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.972
Error típico	0.008
Observaciones	31

De acuerdo con el coeficiente de correlación la aproximación de la regresión es buena, dada su magnitud de 0.972, teniendo una desviación de los datos de tan solo 0.008 unidades, de acuerdo con el análisis de la varianza.

La regresión lineal calculada para el desplazamiento volumétrico a una apertura de 50° se reporta en la Figura 5.31 y el análisis ANOVA se reporta en el Anexo B.1

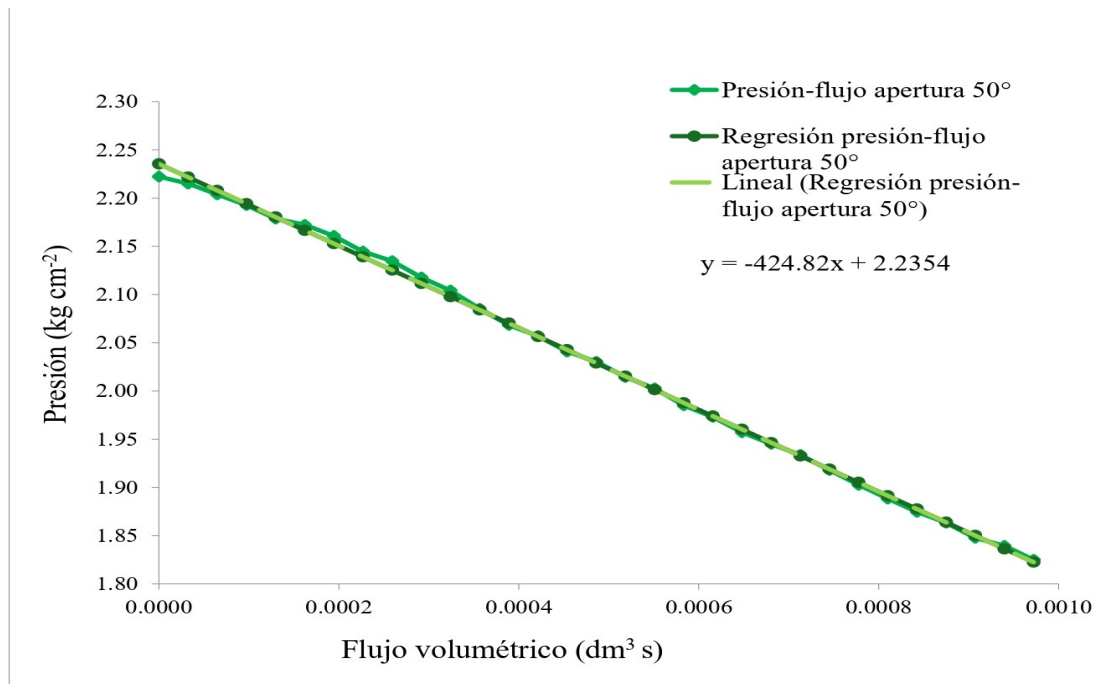


Figura 5.31: Regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 50°

En este caso, los datos se ajustan de mejor manera a la regresión lineal, confirmado por el valor de la magnitud del estadístico del coeficiente de determinación de 0.998 reportado en la Tabla 5.12 mostrando una mayor precisión en las pruebas.

Tabla 5.12: Estadísticos regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 50°

Coefficiente de correlación múltiple ( $R$ )	0.999
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.998
Error típico	0.004
Observaciones	31

Se continuó las pruebas para los ángulos de 90° – 360°, sin embargo, la velocidad con la que desplazaban el volumen de agua era demasiado rápido para poder generar con precisión un buen análisis de desplazamiento volumétrico, por lo que, con el mismo principio, se decidió aumentar el volumen de agua desplazado haciendo la trampa de agua más grande.

Para poder aumentar el volumen de agua, se utilizó una tina de agua más grande y se utilizó una probeta de plástico de 1 dm<sup>3</sup> de capacidad, dentro de esta probeta se colocó una línea de manguera más larga y se utilizó un procedimiento similar para poder llenar el sistema de agua, el sistema ensamblado se muestra en la Figura 5.32

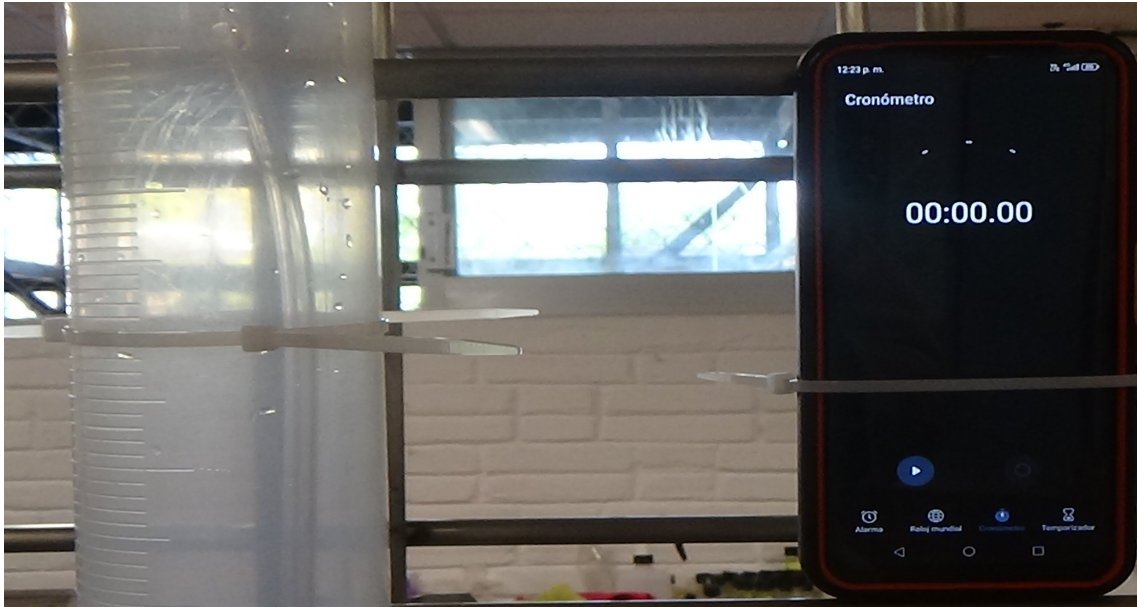


Figura 5.32: Extracto sistema experimental flujo-presión

Durante el desarrollo de estas pruebas se observó que el comportamiento de la válvula a ángulos  $\geq 180^\circ$  es el mismo, por lo que, solo se realizaron pruebas con los ángulos de apertura de  $90^\circ - 180^\circ$ , se siguió el mismo procedimiento que los dos ángulos anteriores, así como el cálculo del promedio y la desviación estándar para cada escenario. Estos se reportan en los anexos B.1 y B.1, el comportamiento para el desplazamiento a los ángulos de  $90^\circ - 180^\circ$  se reporta en la Figura 5.33.

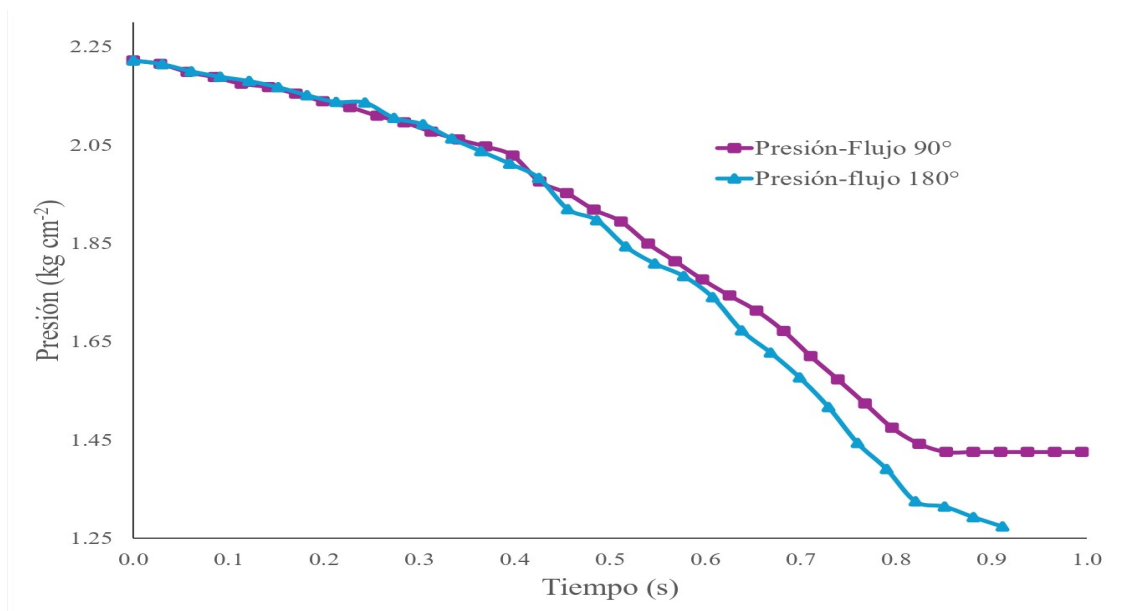


Figura 5.33: Desplazamiento volumétrico apertura  $90^\circ - 180^\circ$

El comportamiento de ambas variables sigue la misma tendencia que los dos ángulos anteriores, con un comportamiento lineal negativa, la diferencia con los otros dos casos recae

en que, en ambos casos de apertura de válvula, las gráficas inician empalmadas y conforme pasa el tiempo, la apertura de 180° aumenta su velocidad, desplazando más rápido el volumen de agua.

De igual manera se realizaron regresiones lineales para estos dos escenarios, siendo la primera la regresión para el ángulo de apertura a 90 mostrada en la Figura 5.34.

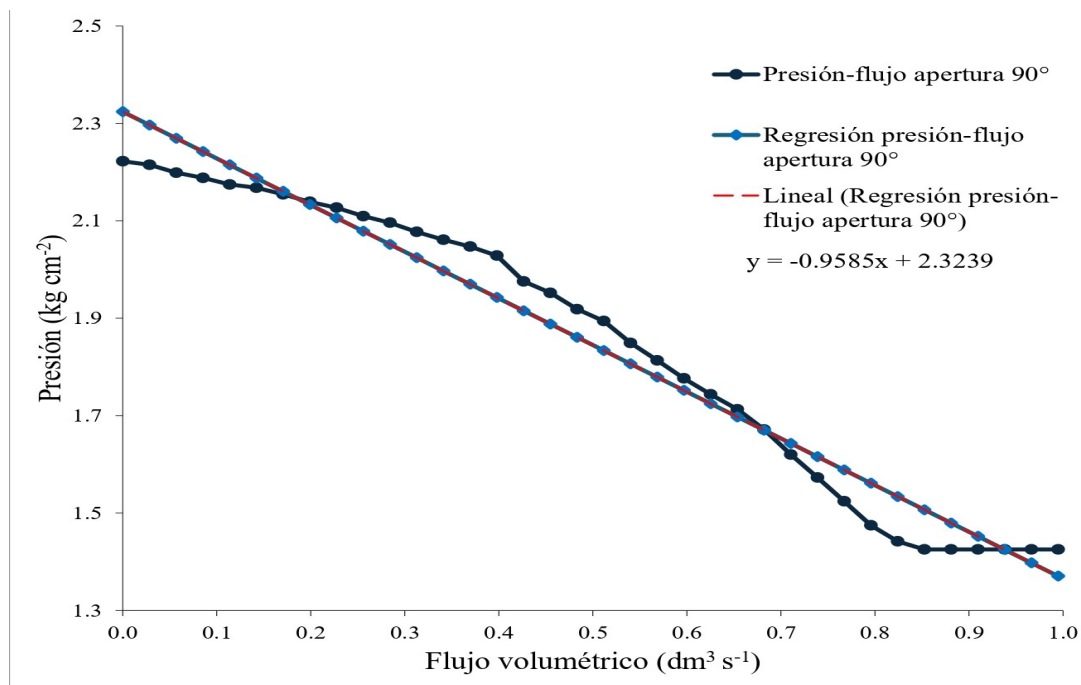


Figura 5.34: Regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 90°

Los estadísticos calculados la regresión del desplazamiento se reportan en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13: Estadísticos regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 90°

Coefficiente de correlación múltiple ( $R$ )	0.982
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.964
Error típico	0.05
Observaciones	36

Para este caso, aunque la aproximación es buena, los datos se encuentran un poco más dispersados de la regresión, mostrado en el error típico, sin embargo, el comportamiento sigue teniendo un comportamiento lineal decreciente. Así mismo, el análisis *ANOVA* expuesto en el Anexo B.1 muestra que la regresión es estadísticamente buena, así como los datos.

La regresión lineal para el caso del desplazamiento volumétrico con una apertura de 180°, se reporta en la Figura 5.35.

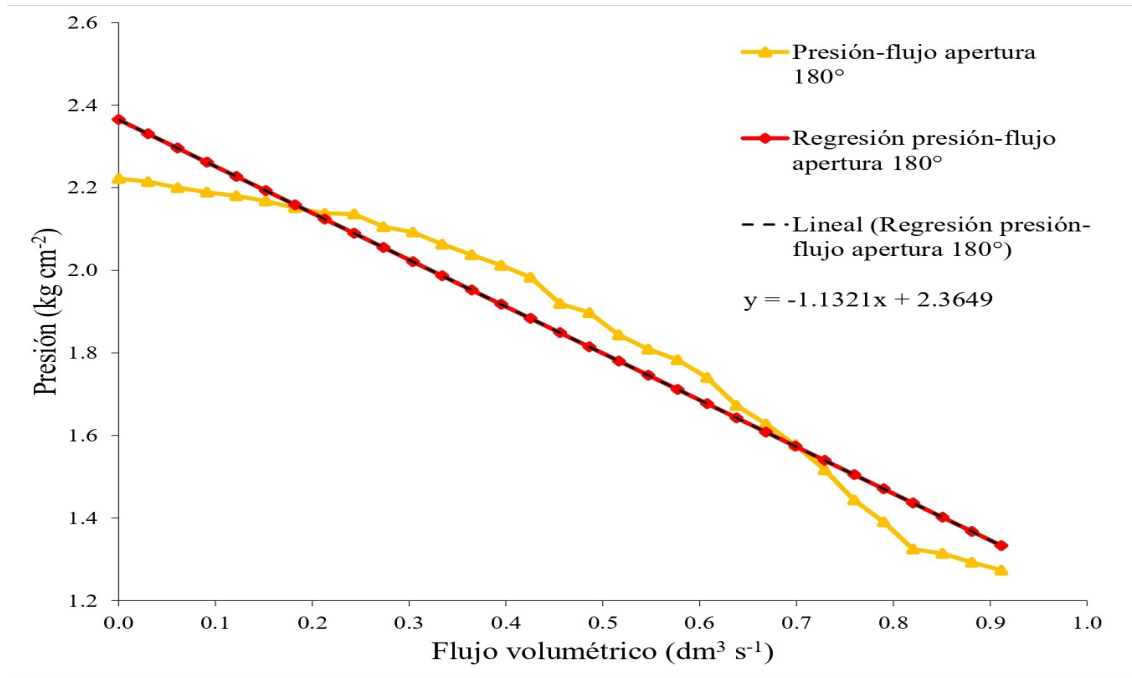


Figura 5.35: Regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 180°

Los estadísticos de esta regresión se reportan en la Tabla 5.35.

Tabla 5.14: Estadísticos regresión lineal desplazamiento volumétrico apertura de 180°

Coficiente de correlación múltiple ( $R$ )	0.973
Coficiente de determinación ( $R^2$ )	0.947
Error típico	0.07
Observaciones	31

El comportamiento lineal con pendiente negativa continúa siendo presente para la apertura de válvula a 180°, sin embargo, la dispersión en los datos es mayor comparada con las otras pruebas. El incremento en la dispersión se debe a una mayor dificultad en manipular una mayor cantidad de gas, aunado al riesgo que implica, sin embargo, los datos entran en la significancia correcta de acuerdo con el análisis ANOVA del Anexo B.1.

## 5.2.2 Presión de detonación

La primera parte que se realizó en esta sección fue la construcción de la plataforma de detonación, la Figura 5.36 muestra la plataforma construida, así como la regla de medición y una burbuja dentro de la misma.

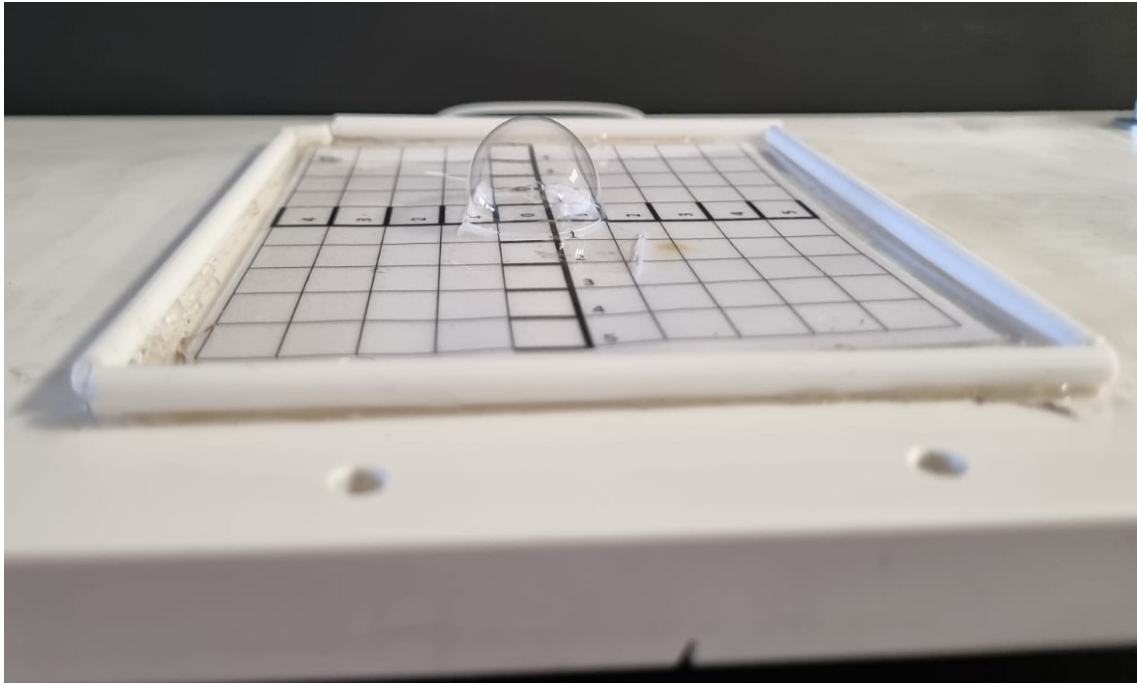


Figura 5.36: Burbuja en plataforma de detonación

Para poder inyectar las burbujas de gas combustible para su detonación, se hizo un análisis de diferentes muestras de mezcla de jabonadura con glicerina, la Tabla 5.15 muestra el resultado de estas pruebas

Tabla 5.15: Análisis de proporción de mezcla jabón-agua-glicerina

Jabón	Muestra	Jabón ( $dm^3$ )	Glicerina ( $dm^3$ )	Agua ( $dm^3$ )	Solución total ( $dm^3$ )	%v/v jabón	%v/v agua	%v/v glicerina
D1	1	0.01	0.0033	0.0267	0.04	25	66.67	8.33
	2	0.01	0.0067	0.0233	0.04	25	58.33	16.67
	3	0.01	0.01	0.02	0.04	25	50.00	25.00
D2	4	0.01	0.0033	0.0267	0.04	25	66.67	8.33
	5	0.01	0.0067	0.0233	0.04	25	58.33	16.67
	6	0.01	0.01	0.02	0.04	25	50.00	25.00
	7	0.01	0.000	0.03	0.04	25	75.00	0.00
	8	0.01	0.02	0.01	0.04	25	25.00	50.00
D3	9	0.01	0.0033	0.0267	0.04	25	66.67	8.33
	10	0.01	0.0067	0.0233	0.04	25	58.34	16.67
	11	0.01	0.01	0.02	0.04	25	50.00	25.00
D4	12	0.01	0.0033	0.0267	0.04	25	66.67	8.33
	13	0.01	0.0067	0.0233	0.04	25	58.34	16.67
	14	0.01	0.01	0.02	0.04	25	50.00	25.00

La descripción realizada al análisis de cada muestra se reporta en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16: Reporte de análisis de muestras de jabonadura

Muestra	Observaciones
1	La burbuja se revienta durante el proceso de inyección.
2	Se logra formar la burbuja, pero su volumen no aumenta después de la inyección total del gas.
3	La burbuja es posible de inyectar y manipular, pero no permite la detonación.
4	La inyección de la burbuja es exitosa, pero no mantiene estabilidad y se revienta antes del proceso de detonación.
5	La burbuja se inyecta con facilidad, pero inmediatamente después revienta.
6	La burbuja se logra inyectar con facilidad y es estable pasado unos minutos, pero no se logra la detonación.
7	No es posible la inyección de la burbuja.
8	No es posible realizar la detonación de la burbuja.
9	La burbuja se revienta poco después de su formación
10	Es posible la inyección de la burbuja, pero revienta a los pocos segundos de su formación.
11	No es posible realizar la detonación de la burbuja.
12	No es posible realizar la inyección de la burbuja.
13	La inyección de la burbuja se realiza con facilidad, pero inmediatamente después revienta.
14	La inyección de la burbuja se realiza con facilidad, tiene buena estabilidad y es posible la detonación.

Se concluyó del análisis de las muestras que la mejor jabonadura (mezcla, jabón, agua y glicerina) y la que se utilizó fue la muestra número 14.

Posterior a la selección y preparación de la mezcla de jabonadura, se realizaron las pruebas de detonación a un volumen de gas de  $0.002 \text{ dm}^3$ .

Cabe mencionar, que durante la realización de las pruebas se utilizó en todo momento, tapones auditivos y gafas de seguridad para minimizar el posible daño generado por la intensidad acústica. Se realizaron cuatro pruebas experimentales para cada posición de las tres coordenadas cartesianas que se definieron. Posteriormente se realizó el análisis estadístico que se reporta en el Anexo B.2. La intensidad acústica promedio de cada una de las componentes del sistema cartesiano y su evolución respecto de la posición se reportan en la Figura 5.37.

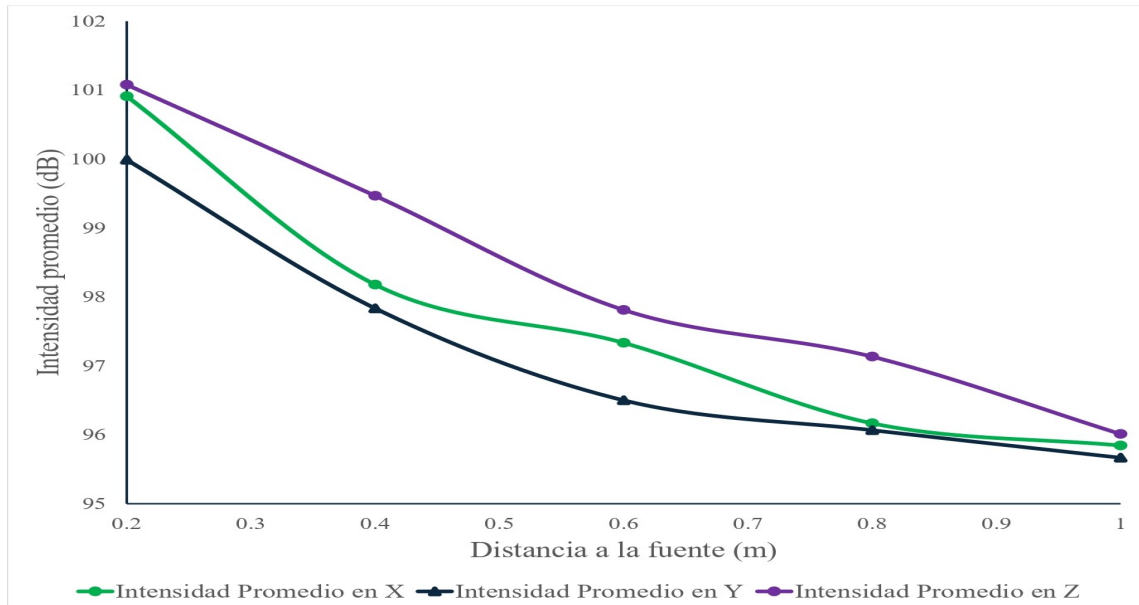


Figura 5.37: Intensidad acústica detonación  $0.002 \text{ dm}^3$

Se puede observar un comportamiento en el que la intensidad acústica disminuye conforme se aleja de la fuente de la detonación, en un comportamiento logarítmico.

La magnitud de la intensidad acústica se encuentra por encima de los niveles que la norma considera peligroso para la salud auditiva, siendo el valor más alto (el más cercano a la fuente) del orden de  $100 \text{ dB}$  y el más bajo (el más lejano a la fuente) del orden los  $96 \text{ dB}$ .

Posteriormente, se realizó el cálculo de la sobrepresión de detonación, basado en los datos promedios. Los cálculos se reportan en el Anexo B.2 y la evolución de la sobrepresión de detonación respecto de la distancia a la fuente se encuentra graficada en la Figura 5.38

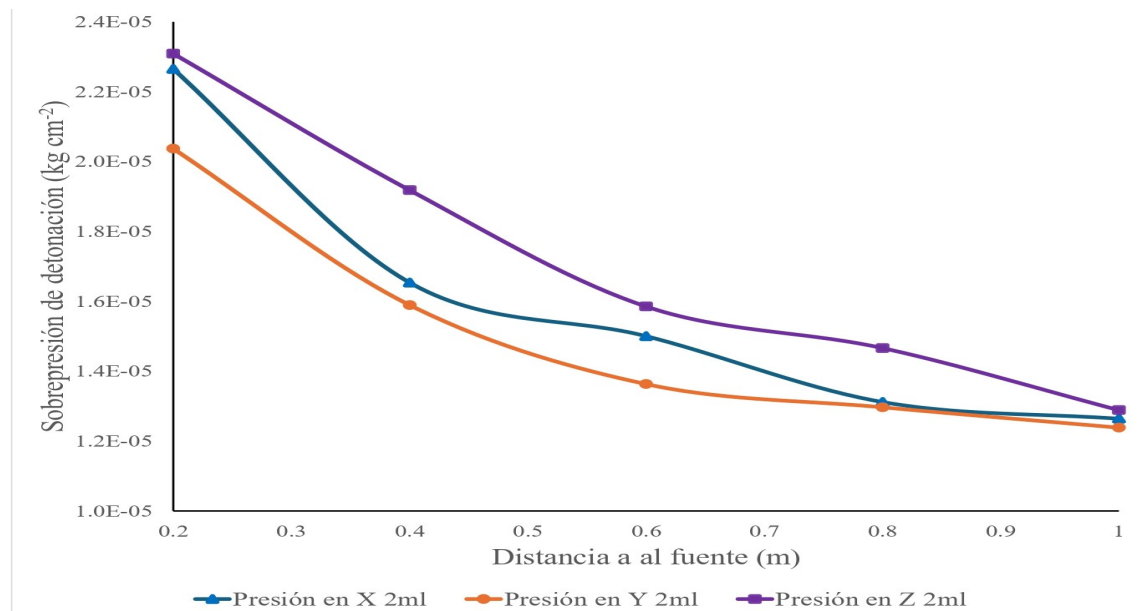


Figura 5.38: Sobrepresión de detonación  $0.002 \text{ dm}^3$

Para este caso, la magnitud de la sobrepresión se encuentra en un orden de magnitud muy pequeño (del orden de  $10^{-5} \text{ kg cm}^{-2}$ ), eso quiere decir, que para una detonación con una pequeña cantidad de gas ( $0.002 \text{ dm}^3$ ) la fuerza que la detonación ejerce es insignificante, sin embargo, la energía que se libera en forma de intensidad acústica es demasiado alta al punto de ser dañina.

Para una detonación de  $0.004 \text{ dm}^3$  el comportamiento de la intensidad sonora se reporta en Figura 5.39, mientras que su estadística se reporta en el Anexo B.2.

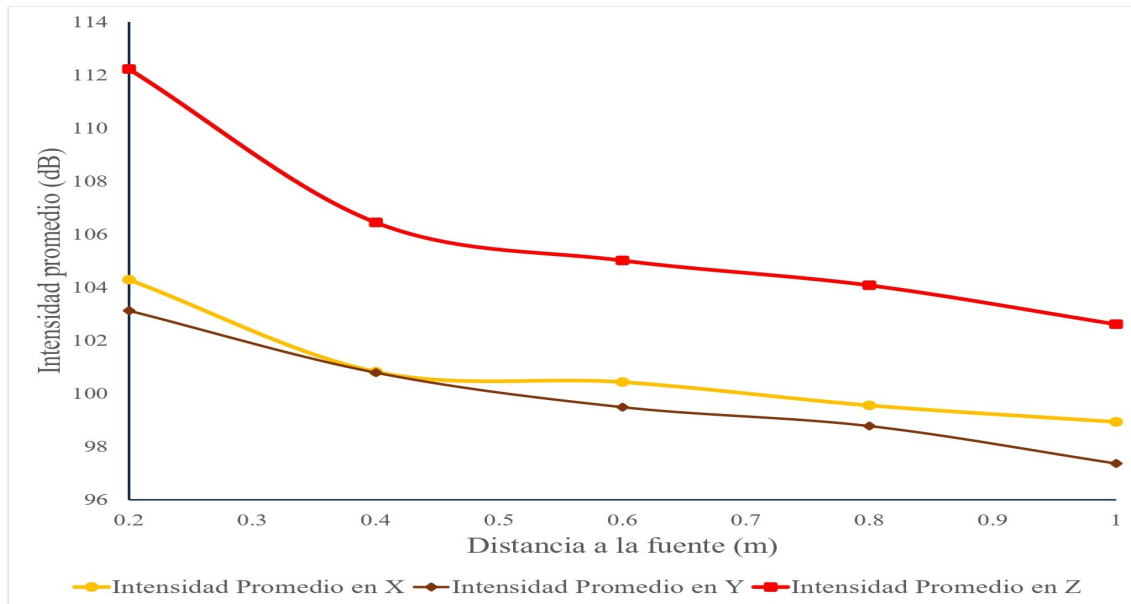


Figura 5.39: Intensidad acústica detonación  $0.004 \text{ dm}^3$

El comportamiento es similar a la detonación de  $0.002 \text{ dm}^3$ , pero su intensidad sonora es más alta estando en el orden  $\geq 100 \text{ dB}$ , mostrando que en cuanto mayor sea el volumen que se detona mayor será su intensidad acústica, volviéndolo más peligroso para la salud auditiva.

La sobrepresión que se calculó de la definición de decibel con los datos promedios obtenidos en las pruebas realizadas se graficó en la Figura 54, los datos calculados se reportan en el Anexo B.2

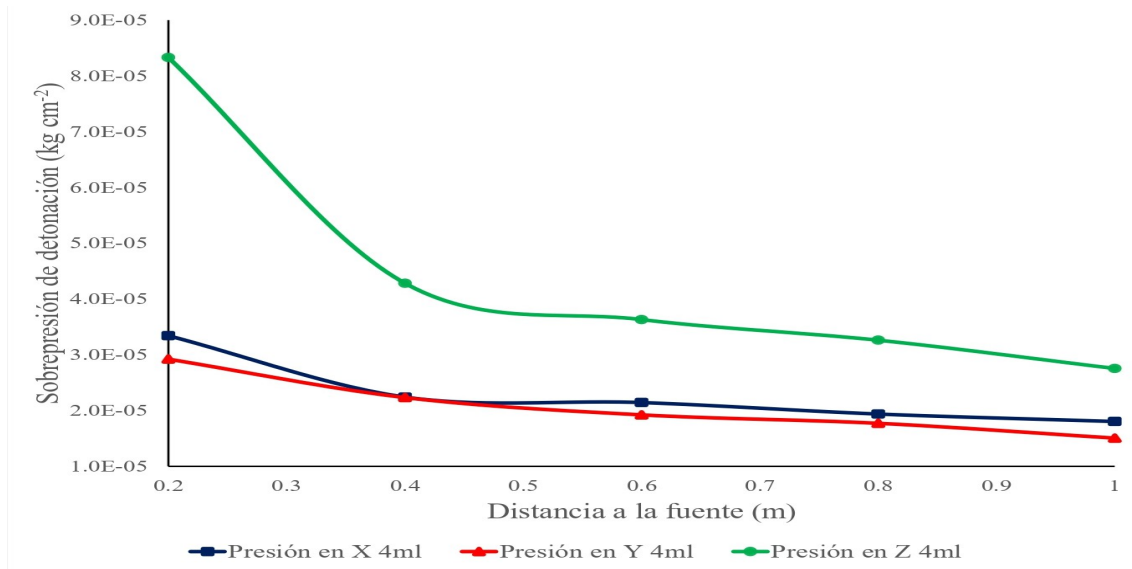


Figura 5.40: Sobrepresión de detonación  $0.004 \text{ dm}^3$

El comportamiento es similar a la detonación anterior, así como el orden en que se encuentra la sobrepresión de detonación, mostrando que la energía mecánica (en forma de presión) no presenta una gran significancia para generar un daño a la salud del usuario, sin embargo, la intensidad acústica si es considerable, por lo que se utiliza, en todo momento, equipo de protección auditiva.

### 5.2.3 Deflagración en escenario de *backfire*

La primera parte por realizar fue la construcción de la plataforma de deflagración. Posterior a la construcción se realizó el ensamble del sistema experimental, el cual se presenta en la Figura 5.41.



Figura 5.41: Arreglo experimental pruebas de deflagración

Después del ensamblaje del sistema experimental se procedió a la realización de las cuatro pruebas experimentales, de las cuales se realizó la estadística básica reportada en el Anexo B.3. Se tomaron los datos promedio referentes a la sobrepresión y se graficó su evolución respecto del tiempo y se reporta en la Figura 5.42

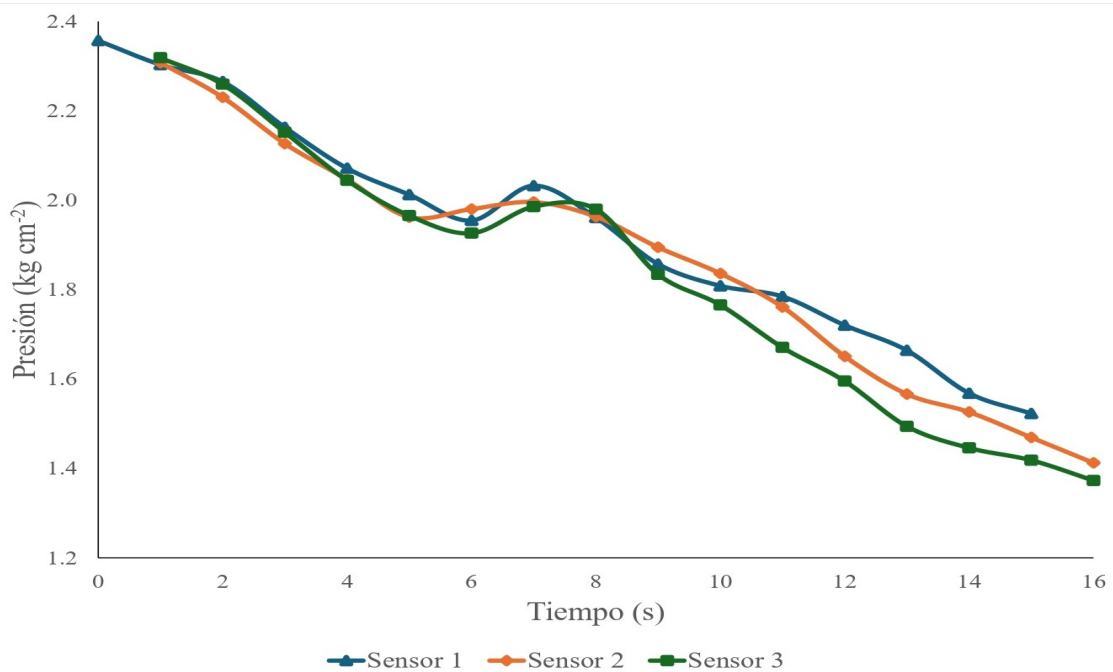


Figura 5.42: Comportamiento de la deflagración durante *backfire*

Se observa un primer pico referente al llenado de la línea, instantes después se puede observar un mayor pico de la presión, que hace referencia el momento del fenómeno de deflagración, causada por la sobrepresión del gas en la línea.

Por otro lado, en el momento, cuando ocurre la deflagración, se puede observar un destello luminoso consecuencia del fenómeno, cuando se da el momento de mayor intensidad ocurre el aumento de la presión.

Para determinar ese instante, como se describió en el capítulo anterior, se grabaron videos del fenómeno, esos videos se ralentizaron para poder determinar, mediante el análisis de imagen, el tiempo que tarda en producirse el destello lumínico. La Figura 5.43 muestra un ejemplo de la gráfica que el programa realizado en *MATLAB* arroja al realizar el análisis de imagen.

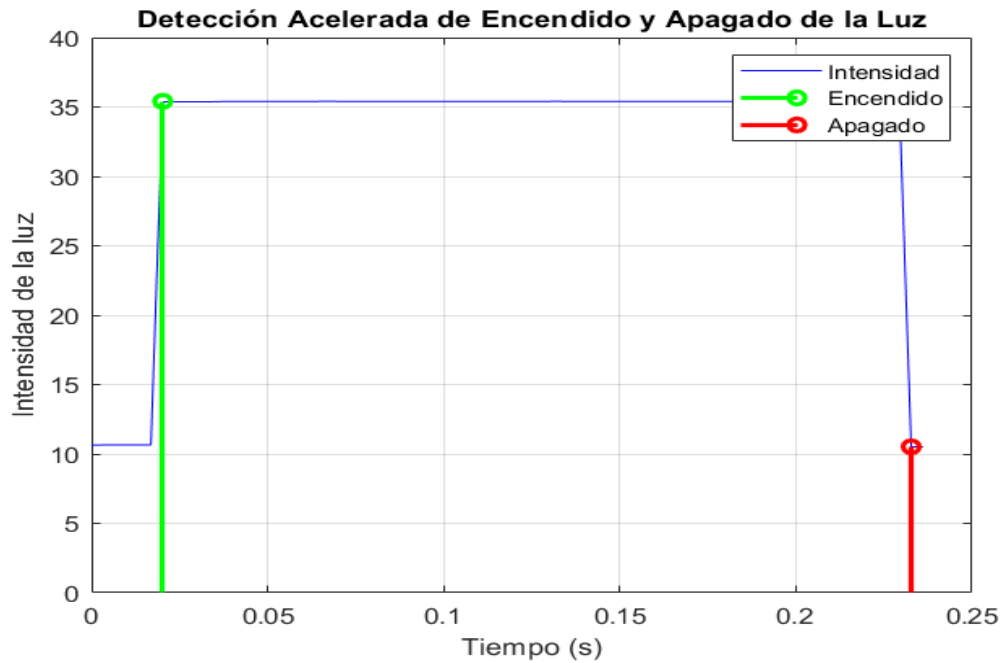


Figura 5.43: Análisis de intensidad lumínica durante *backfire*

En la gráfica, el marcador de color verde indica que el punto donde se da el inicio del destello de deflagración y, al pasar el tiempo, este deja de brillar, indicando que el fenómeno ha concluido, representado por el marcador rojo.

Este proceso se repitió con las cuatro pruebas experimentales realizadas y con las dos longitudes de tubería que se utilizaron para esta sección. La Tabla 5.17 muestra el tiempo que se demoró en darse el fenómeno de destello y su correspondiente velocidad calculada con la definición de velocidad para una longitud de tubería de  $0.4\text{ m}$ .

Tabla 5.17: Tiempo y velocidad de flama ( $0.4\text{ m}$ )

Tiempo (s)	Velocidad ( $\frac{m}{s}$ )
0.12	3.333
0.13	3.077
0.14	2.857
0.16	2.500
Promedio ( $\frac{m}{s}$ )	
0.137	2.942
Desviación estándar	
0.015	0.31

En la Tabla 5.18 se reportan los datos para una línea con longitud de  $1.86\text{ m}$ .

Tabla 5.18: Tiempo y velocidad de flama (1.86 m)

Tiempo (s)	Velocidad ( $\frac{m}{s}$ )
0.86	2.163
0.84	2.214
0.85	2.188
0.83	2.241
Promedio ( $\frac{m}{s}$ )	
0.845	2.202
Desviación estándar	
0.011	0.03

---

### Sección 5.3.

---

#### *Objetivo 3*

---

Una vez terminadas las pruebas experimentales, se comenzó con la programación del modelo que describa el entorno experimental. Como paso inicial se definieron las condiciones iniciales y valores críticos para el modelo.

Estos resultados numéricos se obtuvieron de las pruebas de caracterización del equipo de reacción electrolítica. La Tabla 5.19 muestra el conjunto de condiciones iniciales, así como la información técnica del reactor.

Tabla 5.19: Condiciones iniciales y parámetros técnicos modelo simplificado de simulación

Presión inicial ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	1.033
Presión límite ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	2.226
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	22.03
Voltaje ( <i>Volts</i> )	23.9
Corriente ( <i>A</i> )	10
Área de reacción ( $m^2$ )	0.01
Concentración de electrolito (molar)	2
Número de placas	1
Longitud de tubería ( <i>m</i> )	1.5
Diámetro interno ( <i>m</i> )	0.006

Los valores de las condiciones iniciales y los valores constantes servirán para resolver las ecuaciones que relacionan el entorno experimental, mostrado en la Figura 5.44.

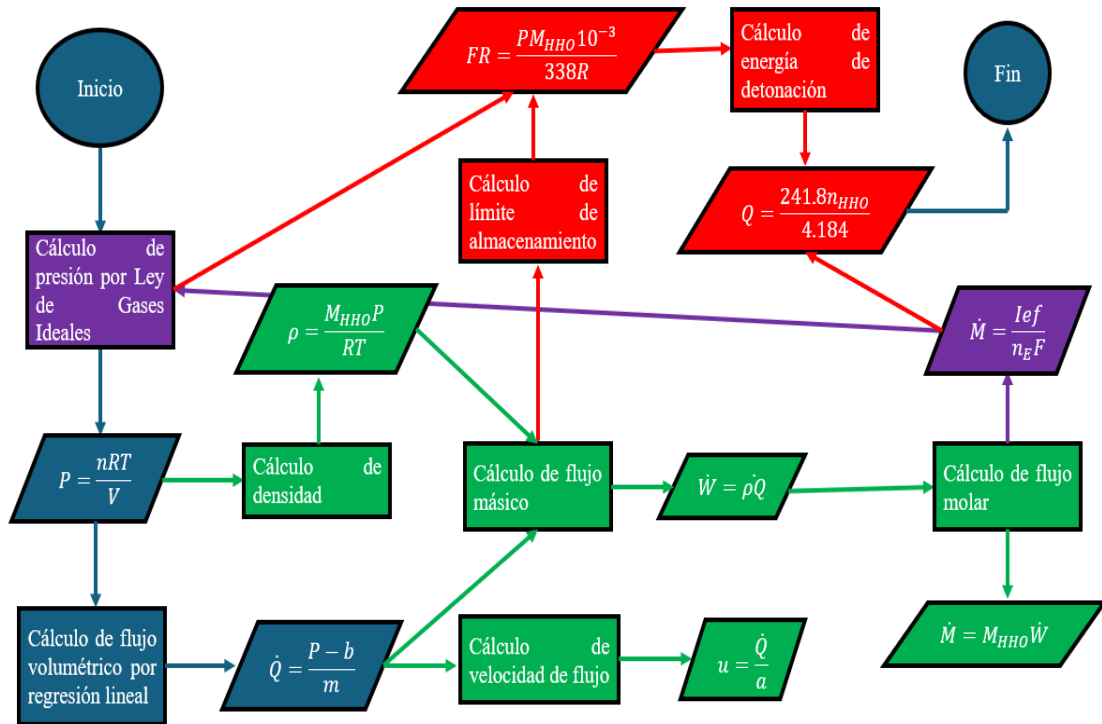


Figura 5.44: Relaciones matemáticas entorno experimental

El diagrama de la Figura 5.44, muestra la relación de las diferentes variables que conforman al entorno experimental. Las variables en azul son las variables que se determinaron de manera experimental, las variables en verde las que fueron calculadas matemáticamente, mientras que las variables en morado las Leyes implementadas, finalmente, las variables en rojo las referentes a los riesgos asociados al gas.

Así mismo, se desarrolló un primer programa del modelo de entorno experimental, que permita al usuario agregar los parámetros técnicos del sistema y las condiciones iniciales y finales. En esta primera versión del modelo sólo se simulan y presentas las variables que se obtuvieron de manera experimental (flujo y presión), esto con el fin de demostrar que el comportamiento observado de manera experimental es similar al calculado por medio de simulación. En el apartado siguiente se agregara el comportamiento calculado de velocidad de flujo, para integrar todas las variables en un solo programa.

El código arroja como resultados en un mensaje de texto los siguientes parámetros:

- La presión máxima alcanzada.
- Energía máxima liberada.
- Cantidad de agua consumida.
- Flujo de gas *HHO* producido (molar y volumétrico).
- Cantidad máxima producida de gas combustible (molar y volumétrico).

- Cantidad máxima de gas que es posible almacenar.
- Equivalencia de TNT.

El reporte de resultados se presenta en la Figura 5.45

✓ La presión se mantiene dentro del límite seguro.

```

--- REPORTE FINAL ---
⊕ Presión máxima alcanzada: 2.12 kg cm{-2}
⊕ Energía máxima liberada: 0.90 kJ
⊕ Agua consumida: 0.07 g (0.07 mL)
⊕ Flujo de gas HHO producido: 0.000062 mol/s (0.2177 dm{3}/s)
⊕ Cantidad total de gas HHO producido: 0.0037 mol (2.60 dm{3})
⊕ Cantidad maxima de gas que es posible almacenar: 0.0027 gr
⊕ Equivalencia de TNT: 0.2156 gr

```

Figura 5.45: Reporte de resultados simulación

De igual manera, el código da como resultados los gráficos del comportamiento de las variables de:

- Presión.
- Energía.
- Riesgo de gas.
- Volumen acumulado.
- Relación Flujo-Presión de descarga.

La gráfica de la Figura 5.46 muestra el comportamiento de la presión de operación respecto del tiempo.

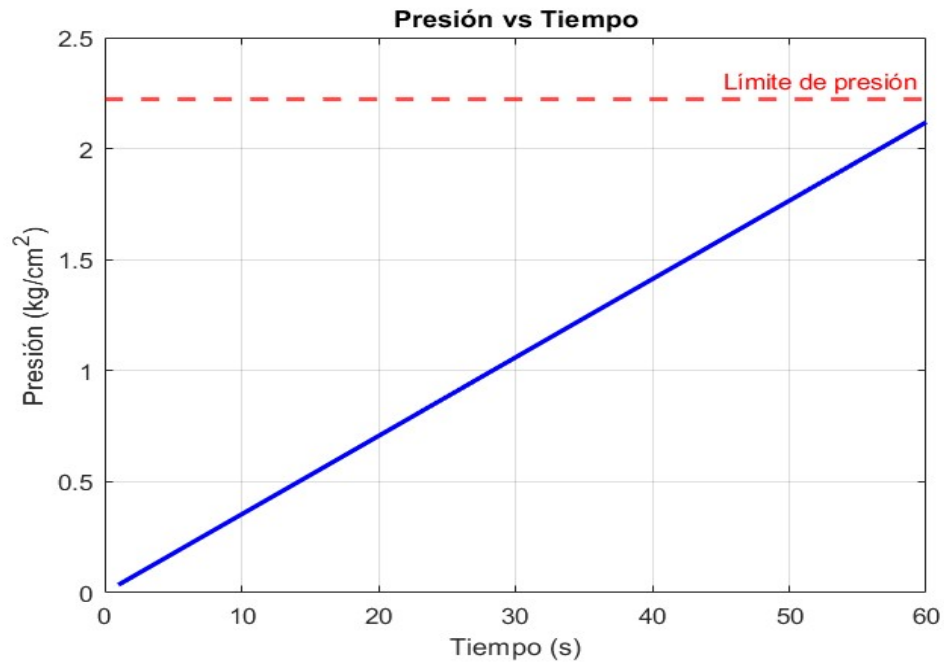


Figura 5.46: Presión de operación respecto del tiempo simulación

Se observa un comportamiento lineal respecto del tiempo al igual que el reportado en los resultados del objetivo 1 encontrado de manera experimental.

La segunda variable, energía acumulada se reporta en la Figura 5.47.

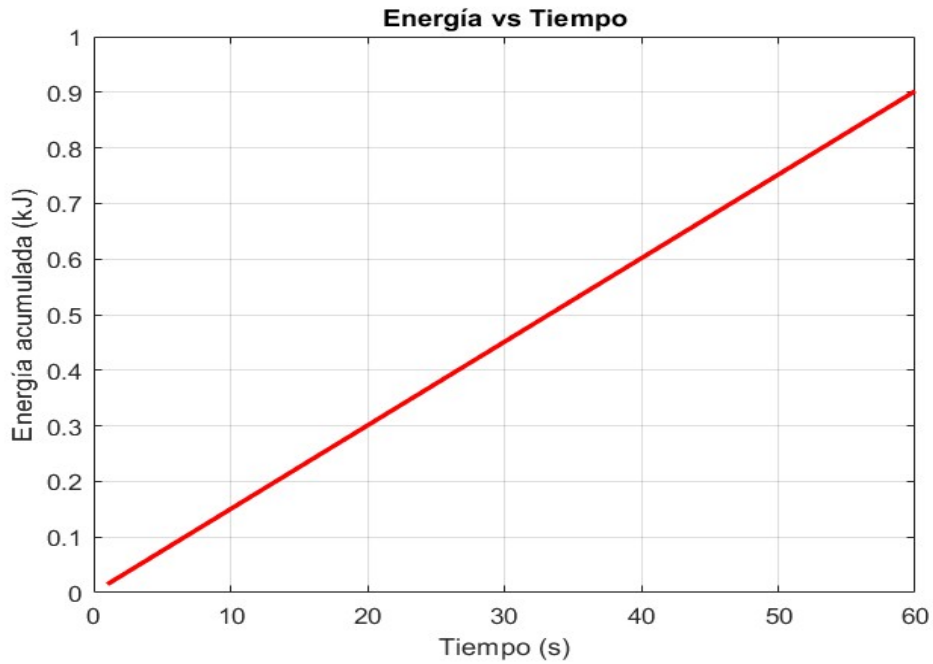


Figura 5.47: Energía respecto del tiempo simulación

Se observa un comportamiento lineal de la energía que se va acumulando, comportamiento esperado dada la linealidad que presenta la acumulación de gas combustible con respecto del tiempo, y dado que la energía depende de la cantidad de gas producido. Dicha linealidad se reporta en la Figura 5.48.

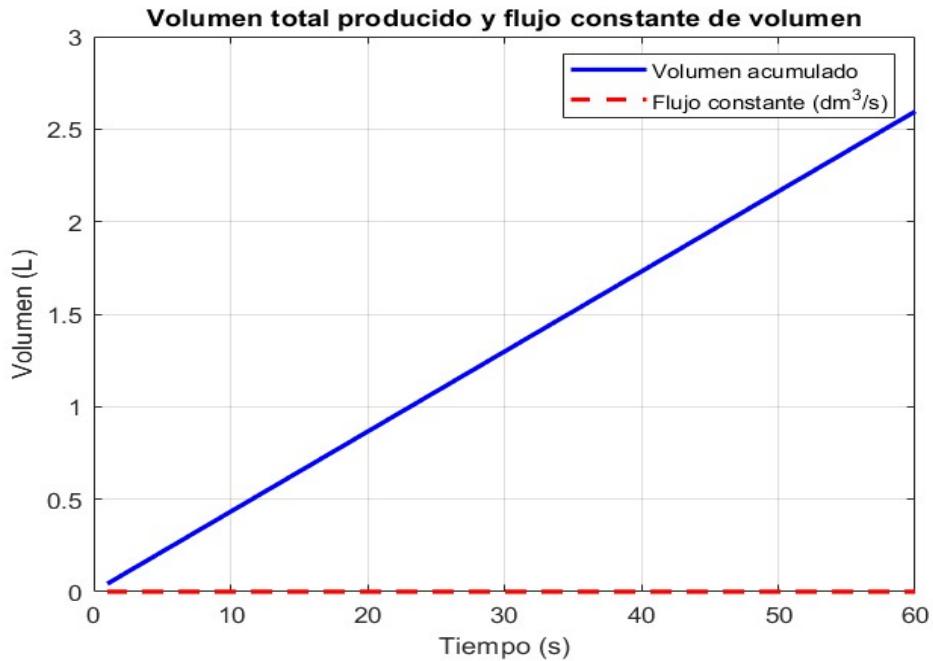


Figura 5.48: Volumen acumulado del tiempo simulación

Finalmente, en la Figura 5.49 se muestra el comportamiento de relación flujo-presión de descarga.

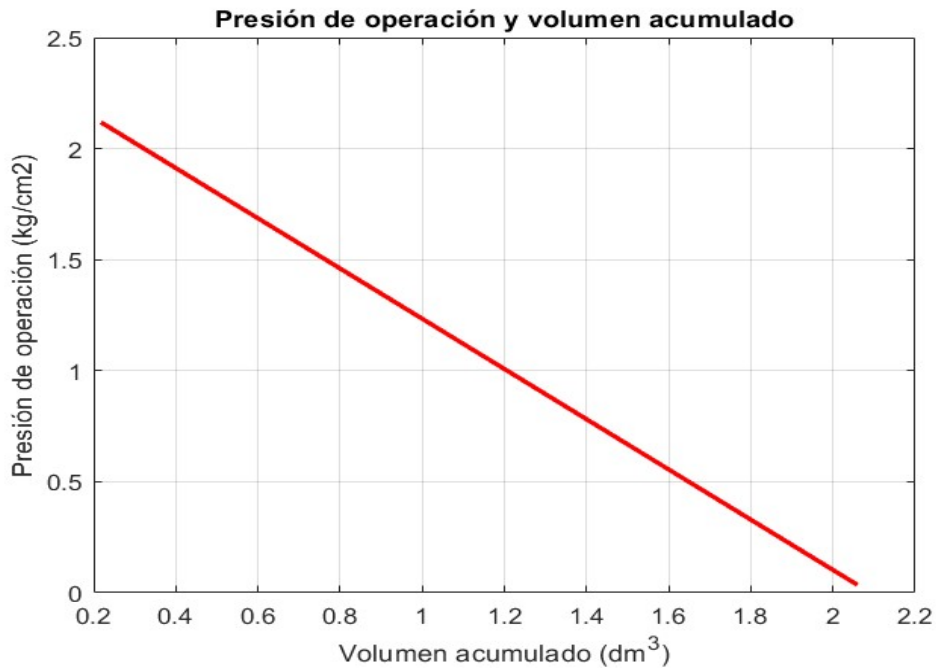


Figura 5.49: Relación flujo-presión simulación

Se observa que el comportamiento es equivalente al reportado en la sección de resultados del objetivo específico 2.

El punto que registra la mayor presión es el momento en que el sistema está cargado con la válvula cerrada, una vez que el sistema se abre, el flujo comienza a aumentar hasta que la presión cae al punto mínimo, es en este momento en que se da el momento de mayor flujo observado por las mediciones.

---

## Sección 5.4.

---

### *Objetivo 4*

---

Como primer objetivo se diseñó la interfaz de usuario, la cual permitirá manipular los valores de entrada para la ejecución de los cálculos. La interfaz se divide en dos partes:

El cálculo de gas instantáneo que se presenta en la Figura 5.50

Controles

Configuración de celdas Serie

Coeficiente a regresión m -3.1645

Coeficiente a regresión b 2.2449

Número de celdas 1

Longitud (cm) 150.0 cm

Díametro de tubería (mm) 6

ef (0-1) 0.90

Presión (kg cm<sup>-2</sup>) 1.033 kg cm<sup>-2</sup>

Figura 5.50: Interfaz de usuario cálculo instantánea

En esta parte se realiza el cálculo de flujo instantáneo, es decir, con valores fijos (o constantes) de:

- Presión.
- Diámetro de tubería.
- Longitud de tubería.
- Cantidad de celdas de electrolizador.

Como se puede observar el usuario puede modificar los valores de presión y longitud de tubería con el objetivo de conocer los diferentes valores que arrojaría el cálculo de gas combustible. Como se observa en la Figura 5.51.

Configuración: Serie  
 Flujo molar: 0.00007 mol s<sup>-1</sup>  
 Flujo volumétrico: 0.00079 dm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>  
 Velocidad de flujo: 0.02805 m s<sup>-1</sup>  
 Cantidad máxima de almacenaje: 0.00278 gr  
 Energía liberada: 0.01692 kJ  
 Equivalencia en gramos de TNT: 0.00404 gr

Figura 5.51: Resultados de cálculo instantáneo de flujo de gas combustible

Se puede observar que los valores que arroja el cálculo son:

- Flujo molar.
- Flujo volumétrico.
- Velocidad de flujo.
- Cantidad máxima de almacenaje.
- Energía liberada.
- Equivalencia de TNT.

Así mismo, esta venta cuenta con una sección en la cual se pueden modificar los coeficientes  $m$  y  $b$  de la regresión lineal para el cálculo del flujo volumétrico. Basados en la ecuación (5.1)

$$P = m\dot{Q} + b \quad (5.1)$$

Dado que se realizará el cálculo de la presión por medio de la Ley de Gases ideales, se realiza un despeje para que el flujo volumétrico quede en términos de la presión. Dicho despeje se reporta en la ecuación (5.2)

$$Q = \frac{P - b}{m} \quad (5.2)$$

Los resultados de la simulación se reportan en la segunda parte de la interfaz, la cual presenta los gráficos como se reporta en la Figura 5.52

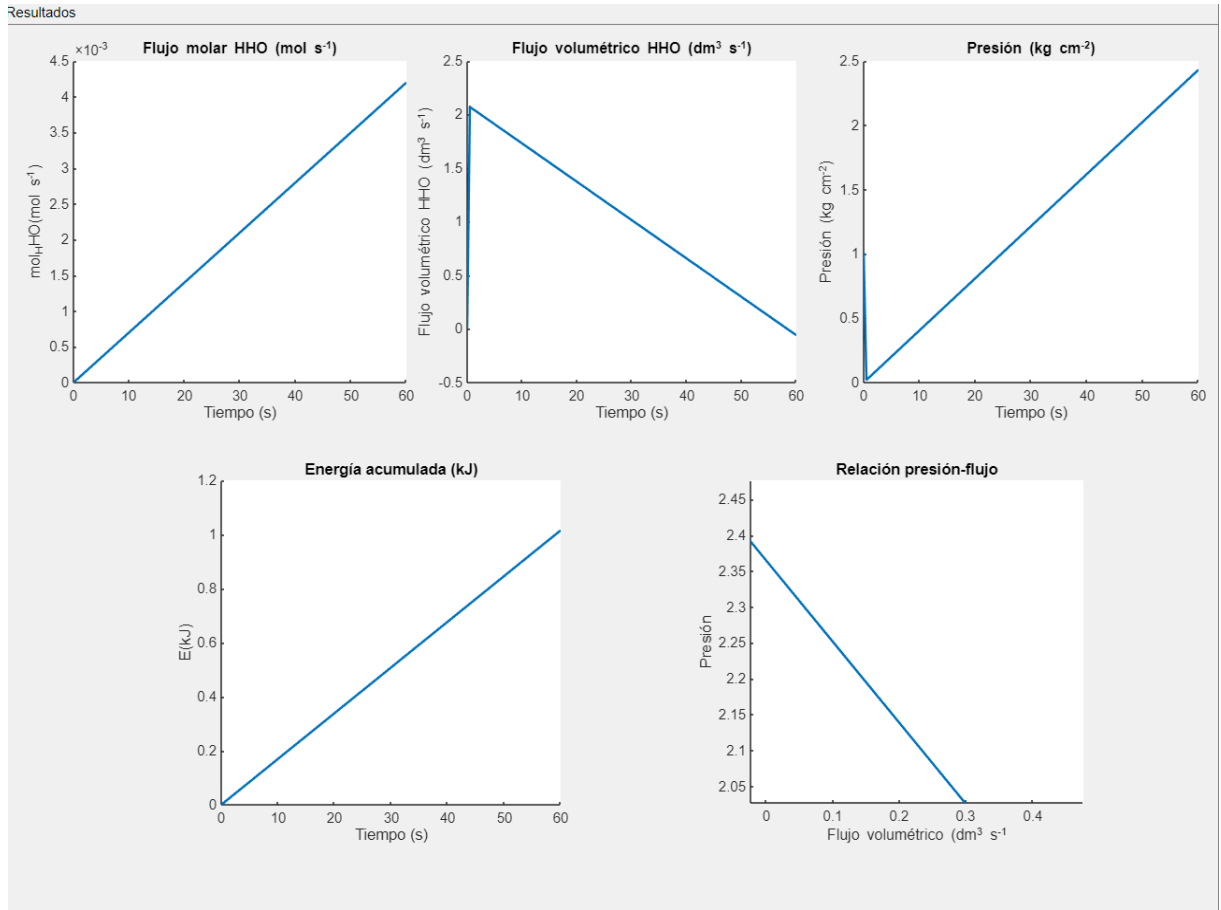


Figura 5.52: Gráficas simulación entorno experimental

Se puede observar que cada uno de los gráficos obtenidos tiene similitud a los obtenidos experimentalmente. A continuación, se realiza el análisis de cada uno de ellos.

Para comenzar, en la Figura 5.53 se reporta el flujo molar respecto del tiempo, calculado por medio de la Ley de Faraday

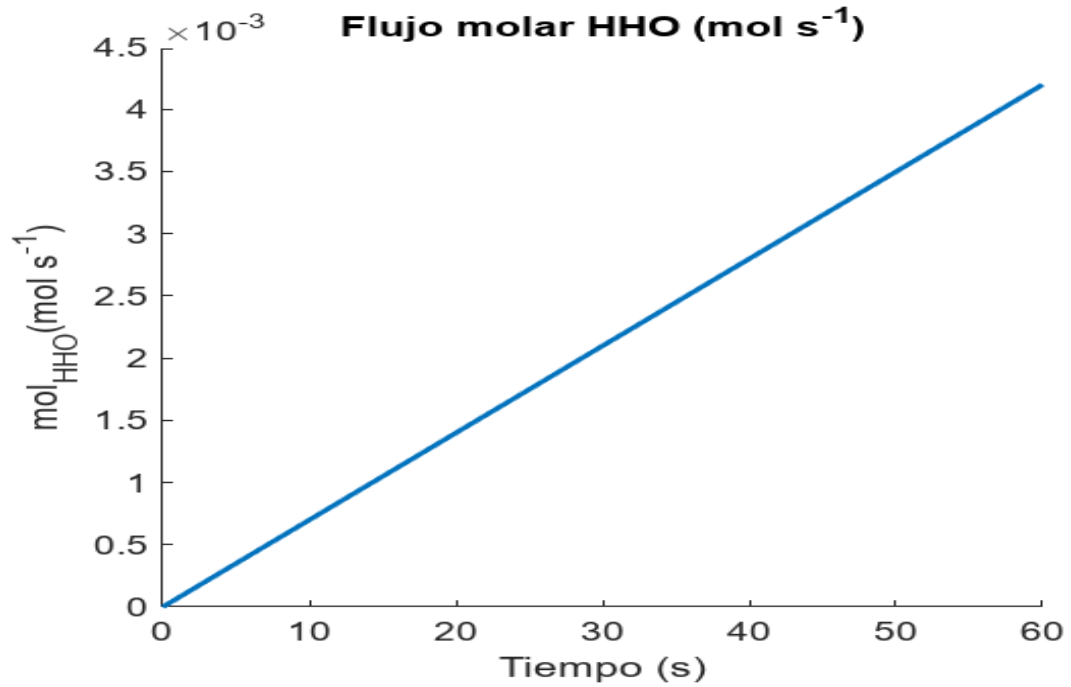


Figura 5.53: Flujo molar respecto del tiempo modelo.

Se puede observar un comportamiento lineal creciente esperado por el comportamiento observado con anterioridad en las pruebas pasadas, y teniendo un valor máximo de  $0.0041 \frac{mol}{s}$ . En la Tabla 5.20 se muestra la comparación de los datos simulados y los obtenidos por medio del cálculo realizado con los valores experimentales de flujo volumétrico.

Tabla 5.20: Comparación de valores flujo molar experimental y simulado

Flujo molar experimental ( $\frac{mol}{s}$ )	0.0039
Flujo molar simulado ( $\frac{mol}{s}$ )	0.0041
% error	5

Para el caso del flujo volumétrico la Figura 5.54 el comportamiento de la variable

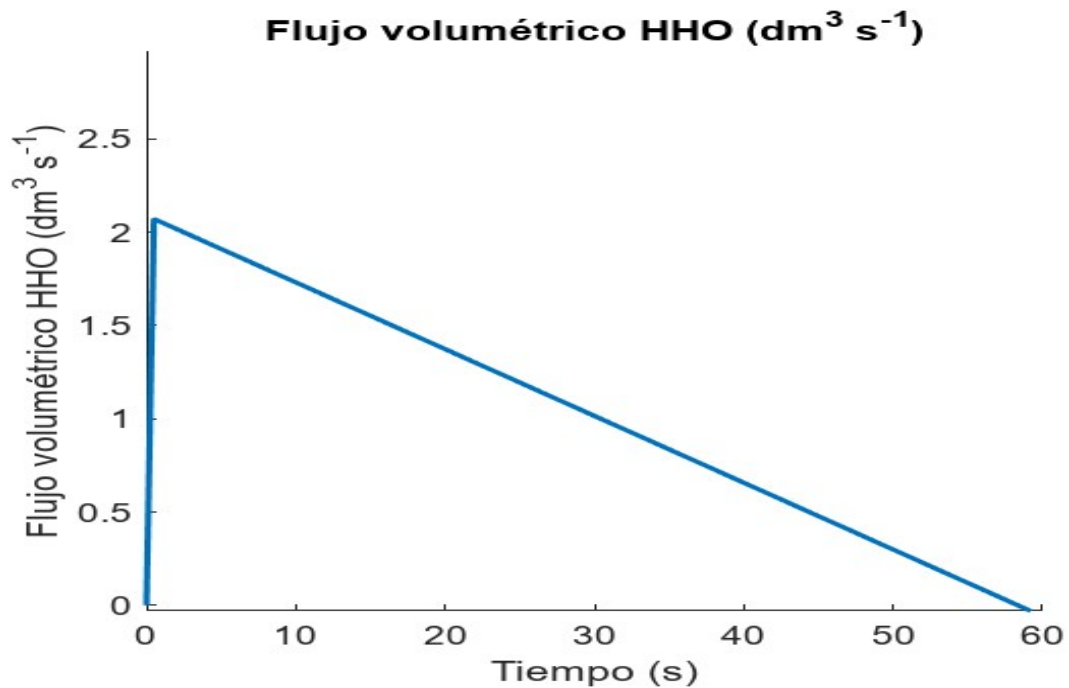


Figura 5.54: Flujo volumétrico respecto del tiempo modelo.

Para el caso de esta variable, tanto en esta versión del modelo como del modelo de la sección anterior se muestra una discrepancia bastante notoria de los datos, teniendo como punto máximo un flujo volumétrico de  $2 \frac{dm^3}{s}$  a diferencia de lo obtenido con el flujómetro. El instrumento mostraba un flujo de  $2.7 \frac{dm^3}{min}$  que al momento de realizar la conversión de unidades arroja un flujo máximo de  $0.045 \frac{dm^3}{s}$ . Esto ocasionado a la dificultad que conlleva la sensibilidad del instrumento y la dificultad de manipular un gas con una densidad muy baja y volatilidad muy alta.

Para el caso de la presión se reporta en la Figura 5.55.

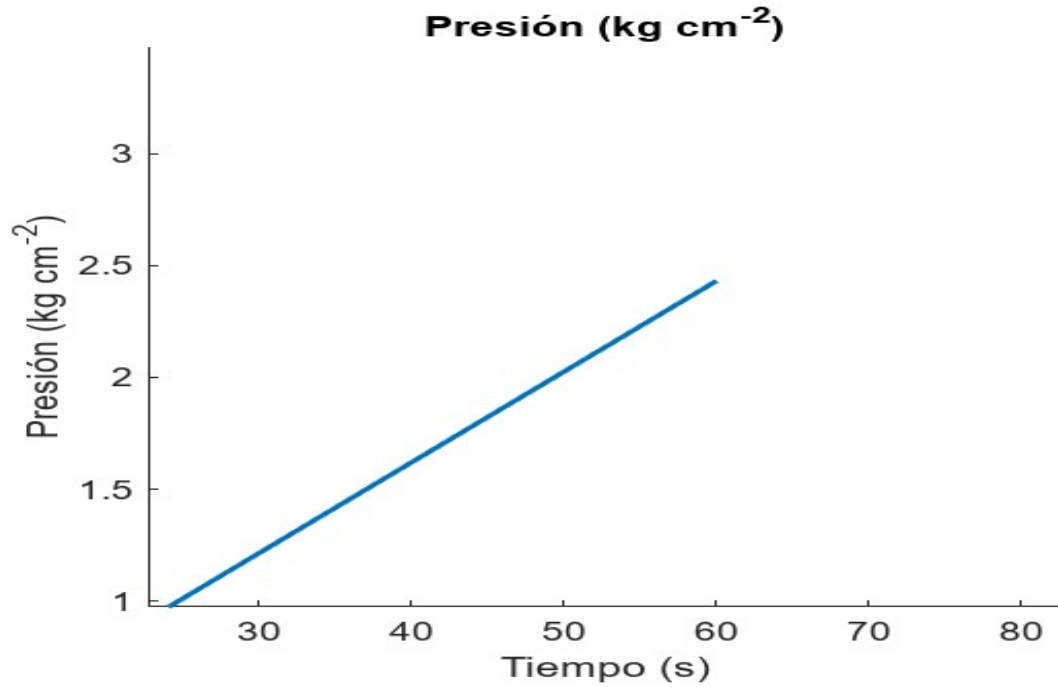


Figura 5.55: Presión de operación respecto del tiempo.

En este caso se muestra que la presión de operación se inicia hasta después de los 30 segundos y obtiene un valor máximo de  $2.4 \frac{kg}{cm^2}$ . Con un comportamiento lineal creciente confirmando el comportamiento observado durante las pruebas experimentales. La Tabla 5.21 muestra una comparación de los datos experimentales y los datos simulados.

Tabla 5.21: Comparación de datos de presión experimental y simulada

Presión experimental ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	2.226
Presión simulada ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	2.43
% error	9

Se muestra un mayor porcentaje de error a diferencia de los datos de flujo molar, debido a la sensibilidad de los sensores utilizados.

A continuación, se presenta en la Figura 5.56 la variable de energía acumulada respecto del tiempo.

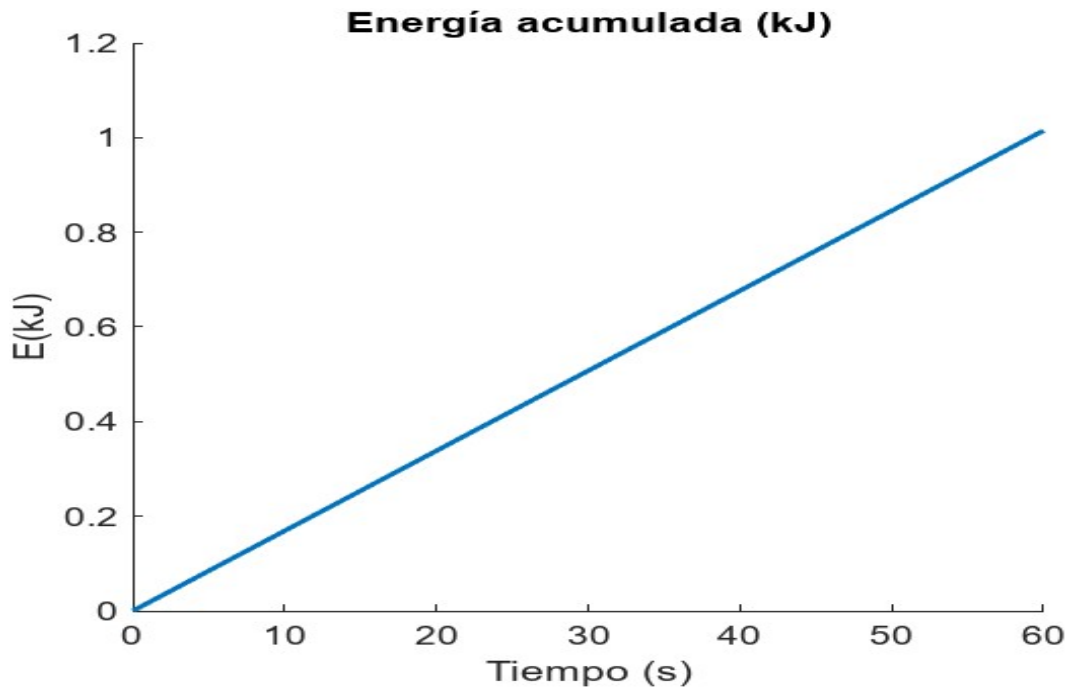


Figura 5.56: Energía respecto el tiempo simulación.

Para esta variable se observa un comportamiento lineal creciente esperado y con el mismo valor máximo de  $1 \text{ kJ}$  al igual que en el caso de la simulación anterior.

Finalmente se presentan las gráficas de relación flujo presión. Para iniciar con estas variables se presenta en la Figura 5.57 la relación de flujo presión a una apertura de  $40^\circ$ .

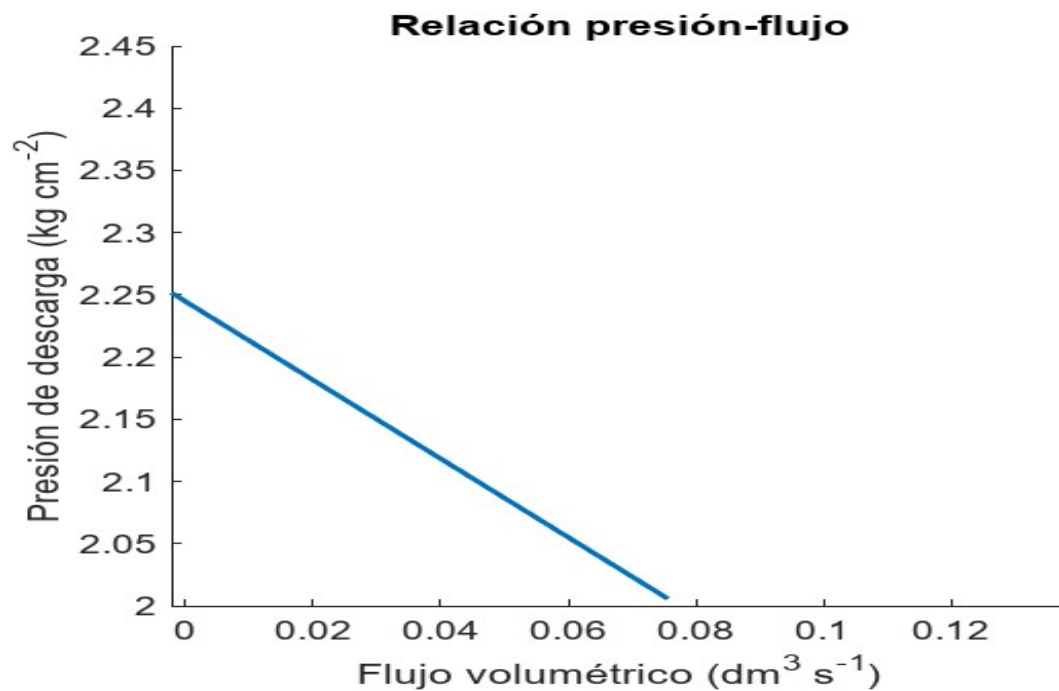


Figura 5.57: Relación flujo presión apertura  $40^\circ$  simulación.

Se presenta un comportamiento similar al observado experimentalmente, en el momento de mayor presión la válvula no se presenta flujo hasta el momento en el que se abre la válvula la presión comienza a disminuir y el flujo aumenta a la descarga. Para una apertura de 50° la Figura 5.58 presenta el resultado de la simulación

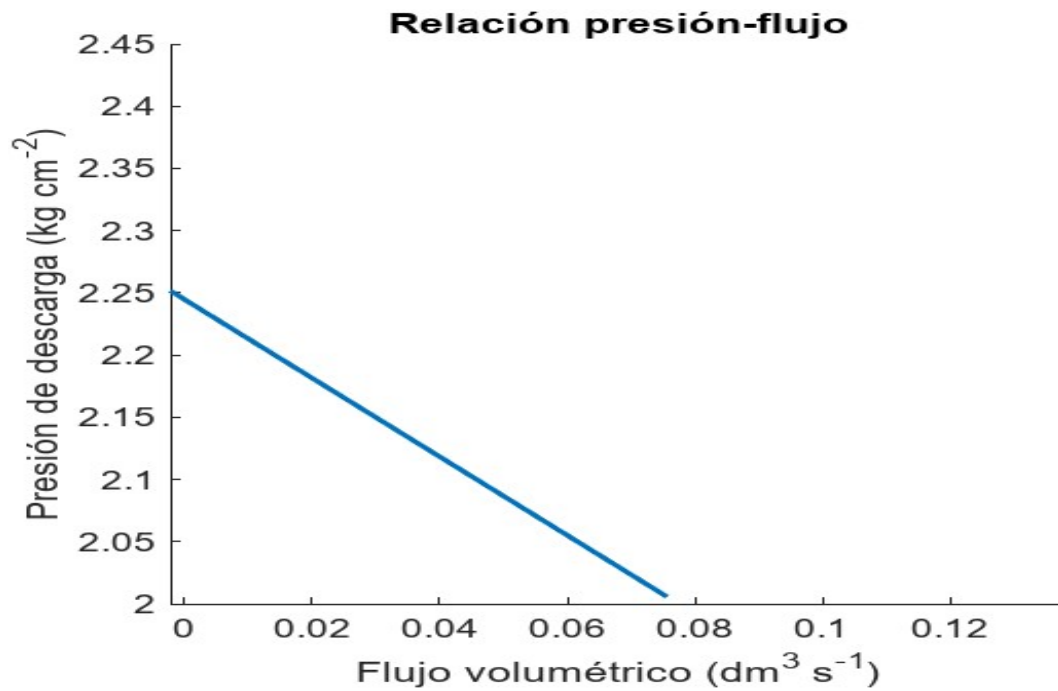


Figura 5.58: Relación flujo presión apertura de 50° simulación.

El comportamiento sigue presentando la misma tendencia que la apertura anterior y que lo observado durante las pruebas experimentales. Para una apertura de 90°, se reporta en la Figura 5.59

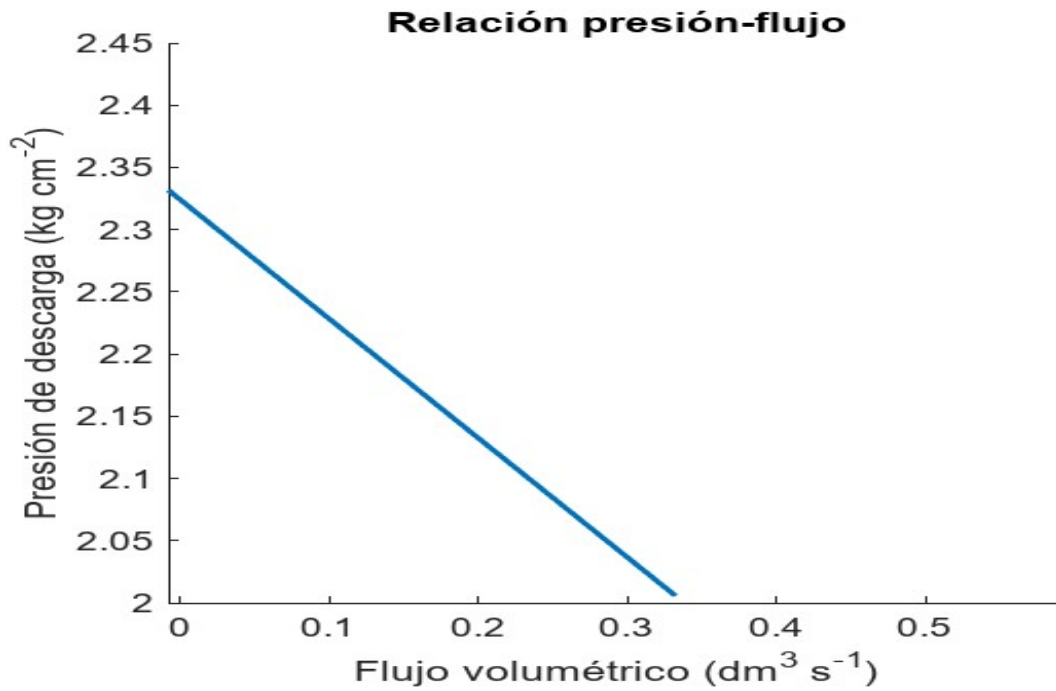


Figura 5.59: Relación flujo presión apertura de 90° simulación.

Se muestra una tendencia lineal con decremento al igual que en las pruebas realizadas en esta sección.

Finalmente, la Figura 5.60 presenta la apertura máxima de válvula de 180°.

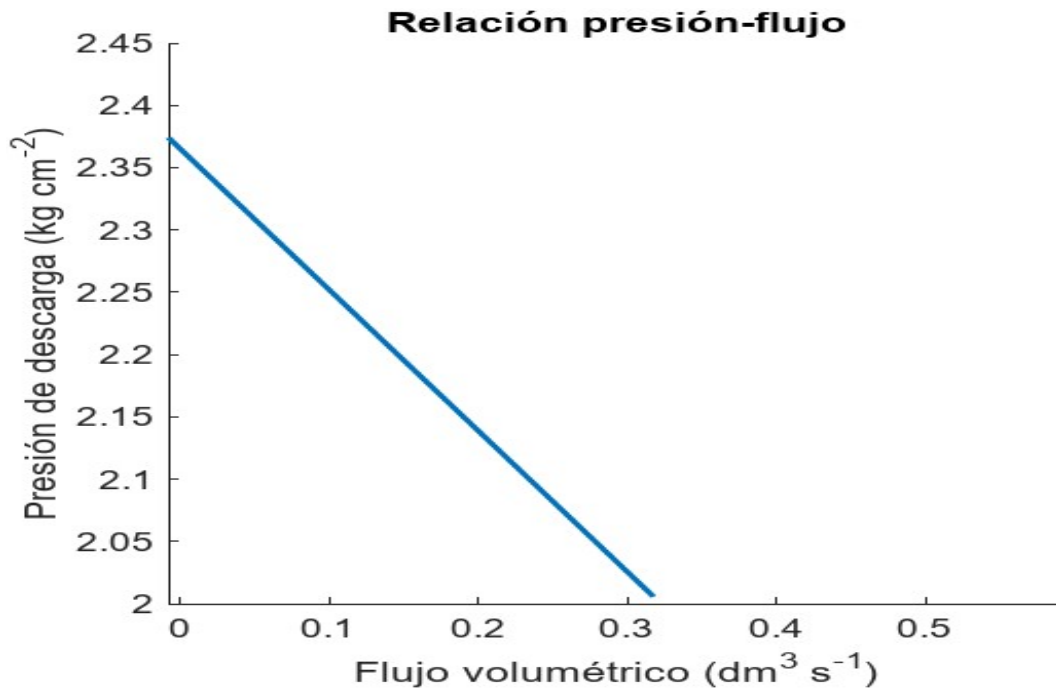


Figura 5.60: Relación flujo presión apertura de 180° simulación.

Presenta un comportamiento lineal con tendencia negativa al igual que las relaciones anteriores y la observada de manera experimental.

## Conclusiones

El desarrollo del modelo matemático propuesto en el Objetivo 4 permitió simular en una plataforma basada en la interfase *GUI* en MATLAB con precisión el comportamiento de las variables operativas críticas del sistema de reacción de electrolisis alcalina;

- Presión.
- Temperatura.
- Velocidad.
- Flujo.

Durante la operación del equipo prototipo reportado por *Pacheco et al. (2023)*. Los resultados obtenidos demuestran que el modelo reproduce adecuadamente los 3 estados operativos del sistema.

1. Operación del vacío al punto máximo.
2. Operación normal estable.
3. Descarga por consumo superior a la producción.

Lo constituye una herramienta robusta para comprender y predecir el desempeño del sistema en condiciones atmosféricas, en situaciones en las cuales podría ser inseguro las pruebas experimentales, aportando una base cuantitativa y cualitativa sólida para el diseño, la optimización y la futura escalabilidad del sistema propuesto para la combustión directa de hidrógeno y oxígeno.

La caracterización de los parámetros de operación; presión, flujo volumétrico, composición, velocidad media del fluido compresible y temperatura permitieron establecer con claridad el rango operativo del sistema de reacción lo que podría permitir formular heurísticas de operación del equipo propuesto y extenderlo a otros equipos con tecnología similar.

Este análisis fue fundamental para establecer un marco de referencia experimental destacando también las variables más significativas en el proceso lo que respalda la validez y la estructura propuesta de los modelos y de las simulaciones desarrolladas.

Por otro lado, el modelo desarrollado evidenció la relación directa y no lineal entre el flujo volumétrico ( $\dot{Q}$ ) y la presión del sistema de reacción. Las simulaciones demostraron que, bajo distintas condiciones de operación (ángulo de apertura de válvula), es posible anticipar el comportamiento del flujo con un grado aceptable de confiabilidad, lo cual constituye un dato valioso para el control y la seguridad del sistema.

Las correlaciones establecidas entre las variables operativas clave mostraron ser consistentes y representativas del entorno real del sistema lo que se puede observar al comparar los resultados gráficos experimentales en comparación con los predichos. Estas relaciones matemáticas relacionaron el aspecto teórico-práctico para describir de manera precisa los estados de operación, facilitando la identificación de condiciones críticas y la optimización de la combustión (balance entre gas producido y consumido para evitar quedarte sin gas o presión).

La simulación del entorno experimental del sistema propuesto para la generación y combustión de hidrógeno, sustentada en las correlaciones matemáticas desarrolladas, mostró una correspondencia sólida con los datos experimentales obtenidos en condiciones reales de operación. Este resultado respalda la consistencia científica del modelo al fundamentarse en leyes y principios teóricos, al mismo tiempo que, su interfaz y cálculos accesibles permiten su uso como herramienta de predicción y control de sistemas de combustión directa de hidrógeno. En conjunto, el modelo contribuye tanto al avance del conocimiento científico como al diseño y escalamiento de tecnologías energéticas sostenibles.

# Datos y estadísticas pruebas experimentales objetivo 1

## Sección A.1.

### *Pruebas presión de descarga*

#### Arranque del equipo

Tabla A.1: Presión absoluta promedio y desviación estándar

Tiempo (s)	Presión Promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar
0	1.033	0.000
1	1.033	0.000
2	1.033	0.000
3	1.033	0.000
4	1.033	0.000
5	1.033	0.000
6	1.033	0.000
7	1.033	0.000
8	1.033	0.000
9	1.033	0.000
10	1.050	0.034
11	1.109	0.017
12	1.135	0.018
13	1.160	0.015
14	1.194	0.021
15	1.230	0.015
16	1.260	0.019
17	1.284	0.020
18	1.312	0.018
19	1.343	0.017
20	1.371	0.015
21	1.399	0.023
22	1.439	0.017
23	1.463	0.017

Continua Tabla A.1		
Tiempo (s)	Presión Promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar
24	1.495	0.017
25	1.522	0.018
26	1.548	0.021
27	1.576	0.017
28	1.604	0.021
29	1.638	0.022
30	1.668	0.017
31	1.697	0.017
32	1.723	0.015
33	1.753	0.021
34	1.779	0.018
35	1.809	0.017
36	1.837	0.021
37	1.870	0.017
38	1.898	0.017
39	1.926	0.017
40	1.952	0.014
41	1.980	0.018
42	2.010	0.017
43	2.038	0.021
44	2.067	0.025
45	2.103	0.017
46	2.129	0.014
47	2.159	0.015
48	2.183	0.021
49	2.209	0.014
50	2.222	0.004
51	2.226	0.004
52	2.222	0.004
53	2.228	0.000
54	2.222	0.004
55	2.222	0.004
56	2.222	0.004
57	2.226	0.004
58	2.220	0.000
59	2.224	0.005
60	2.226	0.004

La medida de la desviación estándar indica la dispersión de los datos, para este caso, el valor de la desviación es pequeño, por lo que los datos están cercanos a la media ((*Mendenhall et al., 2010*), Es decir, podemos asegurar una buena toma de datos.

## Análisis de la varianza Presión de descarga

Tabla A.2: Análisis ANOVA presión de descarga

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	4.861	4.861	95516.313	$1.034 \cdot 10^{-67}$
Residuos	39	0.002	$5.089 \cdot 10^{-5}$		
Total	40	4.863			

Se muestra una alta significancia del modelo, es decir, el modelo es bastante óptimo para la predicción de la presión de descarga respecto del tiempo.

Esta afirmación se puede sustentar debido al bajo valor numérico de la suma de cuadrados de residuos, siendo mayor la cantidad de datos que es posible predecir. Además, si se toma como la hipótesis nula ( $H_0$ ) el que el modelo de regresión no es capaz de predecir el comportamiento de la presión, se puede descartar debido a que su valor es 0, dicho valor se observa en el valor crítico de F. Por lo que la regresión es adecuada para este sistema.

## Operación normal estable

Tabla A.3: Presión absoluta promedio apertura de  $40^\circ$  y desviación estándar

Tiempo (s)	Presión Promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar
0	1.033	0.000
1	1.033	0.000
2	1.033	0.000
3	1.033	0.000
4	1.033	0.000
5	1.033	0.000
6	1.033	0.000
7	1.033	0.000
8	1.033	0.000
9	1.033	0.000
10	1.050	0.034
11	1.109	0.017
12	1.135	0.018
13	1.160	0.015
14	1.194	0.021
15	1.230	0.015
16	1.260	0.019
17	1.284	0.020

Continua Tabla A.3		
Tiempo (s)	Presión Promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar
18	1.312	0.018
19	1.343	0.017
20	1.371	0.015
21	1.399	0.023
22	1.439	0.017
23	1.463	0.017
24	1.495	0.017
25	1.522	0.018
26	1.548	0.021
27	1.576	0.017
28	1.604	0.021
29	1.638	0.022
30	1.668	0.017
31	1.697	0.017
32	1.723	0.015
33	1.753	0.021
34	1.779	0.018
35	1.809	0.017
36	1.837	0.021
37	1.870	0.017
38	1.898	0.017
39	1.926	0.017
40	1.952	0.014
41	1.980	0.018
42	2.010	0.017
43	2.038	0.021
44	2.067	0.025
45	2.103	0.017
46	2.129	0.014
47	2.159	0.015
48	2.183	0.021
49	2.209	0.014
50	2.222	0.004
51	2.226	0.004
52	2.222	0.004
53	2.228	0.000
54	2.222	0.004
55	2.222	0.004
56	2.222	0.004
57	2.226	0.004
58	2.220	0.000
59	2.224	0.005
60	2.226	0.004

Continua Tabla A.3		
Tiempo (s)	Presión Promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar
61	2.202	0.009
62	2.198	0.010
63	2.196	0.015
64	2.166	0.011
65	2.138	0.017
66	2.119	0.042
67	2.084	0.029
68	2.061	0.035
69	2.022	0.039
70	1.981	0.043
71	1.954	0.035
72	1.937	0.013
73	1.981	0.004
74	2.012	0.010
75	2.041	0.011
76	2.096	0.026
77	2.124	0.022
78	2.143	0.017
79	2.164	0.017
80	2.182	0.016
81	2.203	0.007
82	2.214	0.003
83	2.222	0.004
84	2.228	0.000
85	2.226	0.004
86	2.222	0.004
87	2.222	0.004
88	2.220	0.000
89	2.224	0.005
90	2.228	0.000

Se muestra un valor bajo de la desviación estándar para cada uno de los datos tomados en las pruebas, reflejando que los datos de cada prueba no se mantienen lejos de la media aritmética, asegurando una buena toma de datos durante la realización de las cuatro pruebas experimentales.

**Descarga superior a la producción**

Tabla A.4: Presión absoluta promedio apertura de  $50^0$  y desviación estándar

Tiempo (s)	Presión Promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar
0	1.033	0.000
1	1.033	0.000
2	1.033	0.000
3	1.033	0.000
4	1.033	0.000
5	1.033	0.000
6	1.033	0.000
7	1.033	0.000
8	1.033	0.000
9	1.033	0.000
10	1.050	0.034
11	1.109	0.017
12	1.135	0.018
13	1.160	0.015
14	1.194	0.021
15	1.230	0.015
16	1.260	0.019
17	1.284	0.020
18	1.312	0.018
19	1.343	0.017
20	1.371	0.015
21	1.399	0.023
22	1.439	0.017
23	1.463	0.017
24	1.495	0.017
25	1.522	0.018
26	1.548	0.021
27	1.576	0.017
28	1.604	0.021
29	1.638	0.022
30	1.668	0.017
31	1.697	0.017
32	1.723	0.015
33	1.753	0.021
34	1.779	0.018
35	1.809	0.017
36	1.837	0.021
37	1.870	0.017
38	1.898	0.017
39	1.926	0.017
40	1.952	0.014
41	1.975	0.019

Continua Tabla A.4		
Tiempo (s)	Presión Promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar
42	2.010	0.017
43	2.038	0.021
44	2.067	0.025
45	2.103	0.017
46	2.129	0.014
47	2.159	0.015
48	2.183	0.021
49	2.209	0.014
50	2.222	0.004
51	2.226	0.004
52	2.222	0.004
53	2.228	0.000
54	2.222	0.004
55	2.222	0.004
56	2.222	0.004
57	2.226	0.004
58	2.220	0.000
59	2.224	0.005
60	2.226	0.004
61	2.202	0.009
62	2.198	0.010
63	2.196	0.015
64	2.166	0.011
65	2.138	0.017
66	2.119	0.042
67	2.084	0.029
68	2.061	0.035
69	2.022	0.039
70	1.981	0.043
71	1.954	0.035
72	1.929	0.029
73	1.890	0.027
74	1.870	0.027
75	1.835	0.037
76	1.800	0.036
77	1.778	0.038
78	1.772	0.032
79	1.752	0.020
80	1.734	0.013
81	1.732	0.015
82	1.729	0.015
83	1.725	0.011
84	1.735	0.015

Continua Tabla A.4		
Tiempo (s)	Presión Promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar
85	1.733	0.013
86	1.730	0.013
87	1.734	0.011
88	1.734	0.011
89	1.734	0.011
90	1.734	0.011

El valor numérico de la desviación estándar es bajo, manteniéndose en un valor  $< 1$ , por lo que no existe una gran dispersión de los datos respecto del promedio. Por lo que se puede asegurar una buena toma de datos experimentales durante la ejecución de las pruebas.

---

## Sección A.2.

---

### *Pruebas de Flujo volumétrico*

---

### Arranque del equipo

Tabla A.5: Flujo volumétrico promedio y desviación estándar

Tiempo (s)	Flujo Promedio ( $dm^3\ s^{-1}$ )	Desviación estándar
0	0.000	0.000
1	0.000	0.000
2	0.000	0.000
3	0.000	0.000
4	0.000	0.000
5	0.000	0.000
6	0.000	0.000
7	0.000	0.000
8	0.000	0.000
9	0.000	0.050
10	0.001	0.058
11	0.002	0.050
12	0.003	0.000
13	0.005	0.050
14	0.005	0.000
15	0.006	0.050
16	0.007	0.050
17	0.008	0.050
18	0.009	0.058
19	0.010	0.000
20	0.011	0.058

Continua Tabla A.5		
Tiempo (s)	Flujo Promedio ( $dm^3 s^{-s}$ )	Desviación estándar
21	0.013	0.058
22	0.013	0.115
23	0.014	0.058
24	0.015	0.082
25	0.016	0.058
26	0.017	0.096
27	0.018	0.096
28	0.019	0.096
29	0.020	0.082
30	0.021	0.050
31	0.022	0.050
32	0.023	0.050
33	0.024	0.050
34	0.024	0.058
35	0.025	0.082
36	0.026	0.050
37	0.027	0.050
38	0.028	0.050
39	0.029	0.058
40	0.030	0.050
41	0.030	0.096
42	0.031	0.100
43	0.032	0.096
44	0.033	0.141
45	0.034	0.100
46	0.036	0.100
47	0.038	0.100
48	0.039	0.150
49	0.040	0.141
50	0.040	0.150
51	0.042	0.150
52	0.042	0.150
53	0.043	0.126
54	0.044	0.150
55	0.044	0.100
56	0.044	0.100
57	0.045	0.050
58	0.045	0.050
59	0.045	0.050
60	0.045	0.000

El valor numérico de la desviación estándar para estas pruebas muestra un incremento de valor respecto de las pruebas del parámetro anterior. Esto refleja un aumento en la

variabilidad de los datos tomados, sin embargo, se encuentran con un valor numérico bajo, por lo que se desempeñó una buena toma de datos experimentales.

## Análisis de la varianza Flujo volumétrico de descarga

Tabla A.6: Análisis ANOVA flujo volumétrico

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.0089	0.00895	23477.874	$4.24 \cdot 10^{-65}$
Residuos	47	$1.786 \cdot 10^{-5}$	$3.8 \cdot 10^{-7}$		
Total	48	0.009			

La hipótesis nula, definida como el modelo no es capaz de realizar predicciones de flujo respecto del tiempo. Se descarga debido al alto valor de estadístico F y al bajo valor del valor crítico de F, el cual podemos tomar como 0. Por lo que el modelo predice con gran exactitud la linealidad del flujo respecto del tiempo.

## Operación normal estable

Tabla A.7: Flujo volumétrico promedio apertura de  $40^\circ$  y desviación estándar

Tiempo (s)	Flujo Promedio ( $dm^3 s^{-1}$ )	Desviación estándar
0	0.000	0.000
1	0.000	0.000
2	0.001	0.058
3	0.002	0.096
4	0.003	0.082
5	0.005	0.082
6	0.006	0.050
7	0.008	0.050
8	0.010	0.050
9	0.011	0.050
10	0.013	0.058
11	0.014	0.058
12	0.016	0.058
13	0.018	0.058
14	0.019	0.050
15	0.020	0.050
16	0.022	0.082
17	0.023	0.129

Continua Tabla A.7		
Tiempo (s)	Flujo Promedio ( $dm^3 s^{-1}$ )	Desviación estándar
18	0.024	0.129
19	0.026	0.129
20	0.028	0.129
21	0.029	0.096
22	0.030	0.096
23	0.032	0.096
24	0.033	0.082
25	0.035	0.082
26	0.037	0.096
27	0.039	0.129
28	0.040	0.050
29	0.040	0.000
30	0.040	0.000
31	0.039	0.050
32	0.038	0.058
33	0.037	0.000
34	0.037	0.000
35	0.037	0.050
36	0.038	0.082
37	0.039	0.096
38	0.040	0.050
39	0.039	0.058
40	0.039	0.058
41	0.038	0.096
42	0.038	0.100
43	0.038	0.058
44	0.038	0.082
45	0.039	0.096
46	0.039	0.100
47	0.039	0.096
48	0.039	0.058
49	0.038	0.096
50	0.038	0.100

Los datos presentan una mayor variación en comparación con las pruebas anteriores, muestran que la toma de datos tuvo un mayor sesgo, debido a que los datos se dispersan un poco más del valor promedio. Sin embargo, el valor de la desviación estándar sigue siendo bajo haciendo confiable la prueba.

**Descarga superior a la producción**

Tabla A.8: Flujo volumétrico promedio apertura de 50° y desviación estándar

Tiempo (s)	Flujo Promedio ( $dm^3 s^{-1}$ )	Desviación estándar
0	0.000	0.000
1	0.000	0.000
2	0.001	0.058
3	0.002	0.096
4	0.003	0.082
5	0.005	0.082
6	0.006	0.050
7	0.008	0.050
8	0.010	0.050
9	0.011	0.050
10	0.013	0.058
11	0.014	0.058
12	0.016	0.058
13	0.018	0.058
14	0.019	0.050
15	0.020	0.050
16	0.022	0.082
17	0.023	0.129
18	0.024	0.129
19	0.026	0.129
20	0.028	0.129
21	0.029	0.096
22	0.030	0.096
23	0.032	0.096
24	0.033	0.082
25	0.035	0.082
26	0.037	0.096
27	0.039	0.129
28	0.040	0.050
29	0.040	0.000
30	0.040	0.000
31	0.040	0.050
32	0.039	0.050
33	0.037	0.050
34	0.036	0.058
35	0.035	0.096
36	0.033	0.096
37	0.031	0.096
38	0.030	0.096
39	0.028	0.096
40	0.026	0.096
41	0.025	0.050

Continua Tabla A.8		
Tiempo (s)	Flujo Promedio ( $dm^3 s^{-1}$ )	Desviación estándar
42	0.025	0.000
43	0.025	0.000
44	0.025	0.000
45	0.025	0.000
46	0.025	0.000
47	0.025	0.000
48	0.025	0.050
49	0.025	0.000
50	0.025	0.000

Los datos también presentan un valor mayor de desviación estándar comparado con las pruebas anteriores, sin embargo, la dispersión de los datos respecto de la media sigue entrando en un valor aceptable de la desviación estándar, haciendo las pruebas experimentales confiables.

---

### Sección A.3.

---

#### *Cálculo de densidad de gas*

---

Tabla A.9: Cálculo de densidad de gas

Presión promedio ( $kg cm^{-2}$ )	Densidad ( $gr dm^{-3}$ )
1.033	1.483
1.033	1.483
1.033	1.483
1.033	1.483
1.033	1.483
1.033	1.483
1.033	1.483
1.041	1.493
1.051	1.508
1.058	1.518
1.086	1.558
1.141	1.638
1.182	1.696
1.219	1.750
1.259	1.807
1.302	1.869
1.341	1.924
1.373	1.970
1.406	2.018

Continua Tabla A.9	
Presión promedio ( $kg\ cm^{-2}$ )	Densidad ( $gr\ dm^{-3}$ )
1.440	2.067
1.471	2.112
1.501	2.155
1.538	2.207
1.567	2.249
1.596	2.291
1.623	2.330
1.650	2.369
1.676	2.405
1.702	2.442
1.730	2.483
1.757	2.522
1.780	2.555
1.801	2.585
1.826	2.621
1.849	2.654
1.872	2.686
1.893	2.716
1.915	2.748
1.935	2.777
1.956	2.807
1.976	2.836
1.996	2.865
2.016	2.894
2.033	2.918
2.058	2.953
2.100	3.014
2.121	3.044
2.145	3.079
2.166	3.109
2.185	3.136
2.194	3.150
2.197	3.154
2.196	3.152
2.201	3.159
2.197	3.154
2.199	3.157
2.199	3.157
2.201	3.160
2.197	3.154
2.200	3.158
2.202	3.161

## Sección A.4.

### *Pruebas de Velocidad media de fluido compresible*

#### Arranque del equipo

Tabla A.10: Velocidad de flujo promedio y desviación estándar

Tiempo (s)	Velocidad Promedio ( $m s^{-1}$ )	Desviación estándar
0	0.000	0.000
1	0.000	0.000
2	0.000	0.000
3	0.000	0.000
4	0.000	0.000
5	0.000	0.000
6	0.000	0.000
7	0.000	0.000
8	0.000	0.000
9	0.033	0.066
10	0.066	0.077
11	0.166	0.066
12	0.265	0.000
13	0.365	0.066
14	0.398	0.000
15	0.497	0.066
16	0.564	0.066
17	0.630	0.066
18	0.729	0.077
19	0.796	0.000
20	0.862	0.077
21	0.995	0.077
22	1.061	0.153
23	1.127	0.077
24	1.194	0.108
25	1.260	0.077
26	1.359	0.127
27	1.426	0.127
28	1.492	0.127
29	1.592	0.108
30	1.691	0.066
31	1.757	0.066
32	1.824	0.066
33	1.890	0.066
34	1.923	0.077

Continua Tabla A.10		
Tiempo ( <i>s</i> )	Velocidad Promedio ( <i>m s<sup>-s</sup></i> )	Desviación estándar
35	1.989	0.108
36	2.089	0.066
37	2.155	0.066
38	2.222	0.066
39	2.321	0.077
40	2.354	0.066
41	2.420	0.127
42	2.454	0.133
43	2.553	0.127
44	2.653	0.188
45	2.719	0.133
46	2.852	0.133
47	2.984	0.133
48	3.084	0.199
49	3.183	0.188
50	3.216	0.199
51	3.349	0.199
52	3.349	0.199
53	3.415	0.167
54	3.482	0.199
55	3.515	0.133
56	3.515	0.133
57	3.548	0.066
58	3.548	0.066
59	3.548	0.066
60	3.581	0.000

El valor numérico de la desviación estándar es mayor a los datos tomados de la prueba anterior. Este aumento en la incertidumbre de los datos es debido a la realización del cálculo de la velocidad. Dado que se realiza una transformación, el error tiende a aumentar. Sin embargo, el valor sigue estando por debajo de 1.

## Análisis de la varianza y estadísticos regresión lineal Velocidad de flujo de descarga

Tabla A.11: Análisis de la varianza (ANOVA) regresión lineal

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	59.908	59.908	25195.208	$5.725 \cdot 10^{-67}$
Residuos	48	0.114	0.002		
Total	49	60.022			

La regresión explica muy bien el comportamiento de la velocidad respecto del tiempo. Se espera que, para esta variable, siga la tendencia de la variable de flujo dado a que la variable se determine mediante el cálculo matemático.

## Operación normal estable

Tabla A.12: Velocidad de flujo promedio y desviación estándar

Tiempo (s)	Velocidad Promedio ( $m s^{-1}$ )	Desviación estándar
0	0.000	0.000
1	0.000	0.000
2	0.066	0.077
3	0.166	0.127
4	0.265	0.108
5	0.398	0.108
6	0.497	0.066
7	0.630	0.066
8	0.763	0.066
9	0.895	0.066
10	0.995	0.077
11	1.127	0.077
12	1.260	0.077
13	1.393	0.077
14	1.492	0.066
15	1.625	0.066
16	1.724	0.108
17	1.790	0.171
18	1.923	0.171
19	2.056	0.171
20	2.188	0.171

Continua Tabla A.12		
Tiempo (s)	Velocidad Promedio ( $m s^{-s}$ )	Desviación estándar
21	2.288	0.127
22	2.420	0.127
23	2.553	0.127
24	2.653	0.108
25	2.785	0.108
26	2.951	0.127
27	3.117	0.171
28	3.150	0.066
29	3.183	0.000
30	3.183	0.000
31	3.084	0.066
32	2.984	0.077
33	2.918	0.000
34	2.918	0.000
35	2.951	0.066
36	3.050	0.108
37	3.084	0.127
38	3.150	0.066
39	3.117	0.077
40	3.117	0.077
41	3.017	0.127
42	2.984	0.133
43	2.984	0.077
44	3.050	0.108
45	3.084	0.127
46	3.117	0.133
47	3.084	0.127
48	3.117	0.077
49	3.017	0.127
50	2.984	0.133

Al igual que el anexo anterior, al realizar la transformación se muestra un aumento en el error de los datos, mostrado en un incremento en el valor numérico de la desviación estándar. Aún así, los datos son confiables, con un valor bajo.

## Descarga superior a la producción

Tabla A.13: Velocidad de flujo promedio y desviación estándar

Tiempo (s)	Velocidad Promedio ( $m s^{-1}$ )	Desviación estándar
0	0.000	0.000

Continua Tabla A.13		
Tiempo (s)	Velocidad Promedio ( $m s^{-s}$ )	Desviación estándar
1	0.000	0.000
2	0.066	0.077
3	0.166	0.127
4	0.265	0.108
5	0.398	0.108
6	0.497	0.066
7	0.630	0.066
8	0.763	0.066
9	0.895	0.066
10	0.995	0.077
11	1.127	0.077
12	1.260	0.077
13	1.393	0.077
14	1.492	0.066
15	1.625	0.066
16	1.724	0.108
17	1.790	0.171
18	1.923	0.171
19	2.056	0.171
20	2.188	0.171
21	2.288	0.127
22	2.420	0.127
23	2.553	0.127
24	2.653	0.108
25	2.785	0.108
26	2.951	0.127
27	3.117	0.171
28	3.150	0.066
29	3.183	0.000
30	3.183	0.000
31	3.150	0.066
32	3.084	0.066
33	2.951	0.066
34	2.852	0.077
35	2.752	0.127
36	2.619	0.127
37	2.487	0.127
38	2.354	0.127
39	2.222	0.127
40	2.089	0.127
41	2.023	0.066
42	1.989	0.000
43	1.989	0.000

Continua Tabla A.13		
Tiempo (s)	Velocidad Promedio ( $m s^{-s}$ )	Desviación estándar
44	1.989	0.000
45	1.989	0.000
46	1.989	0.000
47	1.989	0.000
48	1.956	0.066
49	1.989	0.000
50	1.989	0.000

Para esta sección los datos muestran un error más bajo respecto de las dos secciones anteriores. Debido a que los datos con los que se realizan los cálculos presentan un menor error.

---

### Sección A.5.

---

#### *Pruebas de Temperatura*

---

Tabla A.14: Temperatura promedio y desviación estándar

Tiempo (s)	Temperatura Promedio ( $^{\circ}C$ )	Desviación estándar
0	22.20	0.27
1	22.10	0.38
2	22.10	0.22
3	22.15	0.34
4	22.20	0.37
5	22.15	0.34
6	22.10	0.38
7	22.00	0.50
8	22.05	0.41
9	22.15	0.38
10	22.30	0.27
11	22.10	0.42
12	21.95	0.21
13	21.95	0.33
14	21.70	0.60
15	22.10	0.29
16	22.10	0.22
17	22.00	0.35
18	22.20	0.11
19	22.00	0.18
20	22.15	0.29
21	21.85	0.42

Continua Tabla A.14		
Tiempo (s)	Temperatura Promedio ( $^{\circ}C$ )	Desviación estándar
22	21.80	0.54
23	21.85	0.14
24	22.10	0.38
25	22.00	0.25
26	21.90	0.49
27	21.85	0.14
28	22.10	0.29
29	21.85	0.14
30	22.10	0.29
31	22.20	0.27
32	22.05	0.27
33	22.15	0.34
34	21.95	0.27
35	22.05	0.21
36	22.10	0.29
37	21.85	0.29
38	22.00	0.18
39	21.90	0.52
40	22.00	0.35
41	21.95	0.33
42	21.95	0.41
43	22.00	0.00
44	22.05	0.21
45	22.05	0.37
46	22.00	0.47
47	21.95	0.27
48	22.10	0.34
49	22.05	0.27
50	22.05	0.11
51	22.10	0.29
52	21.85	0.38
53	22.00	0.18
54	22.15	0.34
55	22.25	0.31
56	21.90	0.14
57	21.85	0.49
58	21.90	0.45
59	21.95	0.11
60	22.05	0.41

La dispersión de los datos respecto de la media de cada dato es leve aunque, para esta prueba, es mayor su valor numérico en comparación con los demás parámetros operativos. Sin embargo, este aumento en la dispersión se justifica con el intervalo de error que reporta

el sensor utilizado.

## Datos y estadísticas pruebas experimentales Objetivo 2

### Sección B.1.

#### *Relación-flujo presión*

#### Pruebas apertura de válvula 40°

Tabla B.1: Presión absoluta promedio y desviación estándar

Presión promedio apertura 40° ( $kg\ cm^{-2}$ )	Flujo volumétrico ( $dm^3\ s^{-1}$ )	Desviación estándar presión	Desviación estándar flujo
2.228	0.000	0.000	0.000
2.228	0.002	0.000	0.000
2.231	0.003	0.011	0.000
2.227	0.005	0.001	0.000
2.227	0.007	0.001	0.000
2.214	0.008	0.014	0.000
2.212	0.010	0.015	0.000
2.207	0.012	0.021	0.000
2.204	0.013	0.024	0.000
2.200	0.015	0.028	0.001
2.197	0.017	0.031	0.001
2.192	0.018	0.035	0.001
2.189	0.020	0.036	0.001
2.184	0.022	0.038	0.001
2.181	0.023	0.038	0.001
2.177	0.025	0.040	0.001
2.171	0.027	0.041	0.001
2.166	0.028	0.042	0.001
2.157	0.030	0.041	0.001

Continua Tabla B.1			
Presión promedio apertura 40° ( $kg\ cm^{-2}$ )	Flujo volumétrico ( $dm^3\ s^{-1}$ )	Desviación estándar presión	Desviación estándar flujo
2.149	0.032	0.045	0.001
2.144	0.033	0.047	0.001
2.137	0.035	0.044	0.001
2.129	0.037	0.046	0.001
2.121	0.038	0.046	0.001
2.114	0.040	0.045	0.001
2.093	0.042	0.016	0.001
2.093	0.043	0.016	0.002
2.093	0.045	0.016	0.002
2.093	0.047	0.016	0.002
2.093	0.048	0.016	0.002
2.093	0.050	0.016	0.002

El valor numérico de la desviación estándar se muestra bastante cercano a 0, esto muestra que los datos tomados durante la realización de las pruebas experimentales no se dispersan demasiado de la media.

## Análisis de la varianza Flujo-Presión 40°

Tabla B.2: Análisis ANOVA flujo-presión apertura 40°

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.069	0.069	1005.091	$4.639\ 10^{-24}$
Residuos	29	0.002	$6.85\ 10^{-5}$		
Total	30	0.071			

El valor numérico del valor crítico del estadístico F se encuentra en un orden de magnitud bastante pequeño, señalando a la hipótesis nula (la regresión no representa de manera eficiente el comportamiento del sistema) como falsa.

## Pruebas apertura de válvula 50°

Tabla B.3: Presión absoluta promedio y desviación estándar

Presión promedio apertura 50° ( $kg\ cm^{-2}$ )	Flujo volumétrico ( $dm^3\ s^{-1}$ )	Desviación estándar presión	Desviación estándar flujo
2.222	0.000	0.011	0.000
2.215	0.002	0.009	0.000
2.204	0.004	0.008	0.000
2.193	0.005	0.016	0.000
2.179	0.007	0.020	0.000
2.172	0.009	0.021	0.000
2.161	0.011	0.023	0.000
2.145	0.013	0.027	0.000
2.135	0.014	0.032	0.000
2.118	0.016	0.042	0.000
2.104	0.018	0.049	0.000
2.085	0.020	0.051	0.000
2.068	0.021	0.051	0.000
2.057	0.023	0.051	0.000
2.041	0.025	0.053	0.000
2.030	0.027	0.052	0.000
2.014	0.029	0.054	0.001
2.003	0.030	0.052	0.001
1.985	0.032	0.054	0.001
1.973	0.034	0.061	0.001
1.957	0.036	0.057	0.001
1.945	0.038	0.059	0.001
1.934	0.039	0.058	0.001
1.918	0.041	0.061	0.001
1.902	0.043	0.055	0.001
1.888	0.045	0.049	0.001
1.875	0.046	0.056	0.001
1.863	0.048	0.053	0.001
1.848	0.050	0.053	0.001
1.839	0.052	0.053	0.001
1.825	0.054	0.049	0.001

El comportamiento de la desviación estándar presenta un comportamiento similar al comportamiento de la prueba anterior. El valor numérico se encuentra bastante cercano a 0, por lo que la dispersión respecto de la media es leve.

## Análisis de la varianza Flujo-Presión 50°

Tabla B.4: Análisis ANOVA flujo-presión apertura 50°

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.469	0.469	22284.708	$2.077 \cdot 10^{-43}$
Residuos	29	0.000611	$2.109 \cdot 10^{-5}$		
Total	30	0.471			

La regresión lineal realizada a estas pruebas describe de manera eficiente el comportamiento del fenómeno, dada que la suma de los cuadrados presenta un mayor valor numérico que la suma de residuos, además de contar con un valor en orden de magnitud bastante bajo del valor crítico de F.

## Pruebas apertura de válvula 90°

Tabla B.5: Presión absoluta promedio y desviación estándar

Presión promedio apertura 90° ( $kg\ cm^{-2}$ )	Flujo volumétrico ( $dm^3\ s^{-1}$ )	Desviación estándar presión	Desviación estándar flujo
2.222	0.000	0.011	0.000
2.215	0.002	0.009	0.000
2.204	0.004	0.008	0.000
2.193	0.005	0.016	0.000
2.179	0.007	0.020	0.000
2.172	0.009	0.021	0.000
2.161	0.011	0.023	0.000
2.145	0.013	0.027	0.000
2.135	0.014	0.032	0.000
2.118	0.016	0.042	0.000
2.104	0.018	0.049	0.000
2.085	0.020	0.051	0.000
2.068	0.021	0.051	0.000
2.057	0.023	0.051	0.000
2.041	0.025	0.053	0.000
2.030	0.027	0.052	0.000
2.014	0.029	0.054	0.001
2.003	0.030	0.052	0.001
1.985	0.032	0.054	0.001

Continua Tabla B.5			
Presión promedio apertura 90° ( $kg\ cm^{-2}$ )	Flujo volumétrico ( $dm^3\ s^{-1}$ )	Desviación estándar presión	Desviación estándar flujo
1.973	0.034	0.061	0.001
1.957	0.036	0.057	0.001
1.945	0.038	0.059	0.001
1.934	0.039	0.058	0.001
1.918	0.041	0.061	0.001
1.902	0.043	0.055	0.001
1.888	0.045	0.049	0.001
1.875	0.046	0.056	0.001
1.863	0.048	0.053	0.001
1.848	0.050	0.053	0.001
1.839	0.052	0.053	0.001
1.825	0.054	0.049	0.001

La adquisición de datos experimentales realizados para las cuatro pruebas se realizó con satisfacción, esto se puede afirmar al valor numérico cercano a 0 que muestra la desviación estándar, mostrando que los datos se encuentran bastante cercanos a la media.

### Análisis de la varianza Flujo-Presión 90°

Tabla B.6: Análisis ANOVA flujo-presión apertura 90°

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	2.883	2.883	923.421	$3.139\ 10^{-26}$
Residuos	34	0.106	0.003		
Total	35	2.989			

La regresión es aceptable dado que describe la mayoría de los datos, esto se puede observar dada el alto valor de la suma de cuadrados y del valor del estadístico F

### Pruebas apertura de válvula 180°

Tabla B.7: Presión absoluta promedio y desviación estándar

Presión promedio apertura 180° ( $kg\ cm^{-2}$ )	Flujo volumétrico ( $dm^3\ s^{-1}$ )	Desviación estándar presión	Desviación estándar flujo
2.222	0.000	0.011	0.000
2.215	0.030	0.009	0.007
2.200	0.061	0.009	0.014
2.189	0.091	0.014	0.021
2.180	0.122	0.021	0.028
2.168	0.152	0.023	0.035
2.151	0.182	0.028	0.042
2.138	0.213	0.031	0.049
2.136	0.243	0.051	0.056
2.105	0.273	0.054	0.063
2.092	0.304	0.057	0.070
2.063	0.334	0.061	0.077
2.038	0.365	0.083	0.084
2.012	0.395	0.110	0.091
1.983	0.425	0.146	0.098
1.920	0.456	0.190	0.105
1.897	0.486	0.179	0.113
1.844	0.516	0.178	0.120
1.809	0.547	0.180	0.127
1.783	0.577	0.168	0.134
1.740	0.608	0.153	0.141
1.673	0.638	0.169	0.148
1.628	0.668	0.209	0.155
1.577	0.699	0.235	0.162
1.517	0.729	0.215	0.169
1.444	0.760	0.195	0.176
1.391	0.790	0.163	0.183
1.325	0.820	0.160	0.190
1.314	0.851	0.140	0.197
1.293	0.881	0.099	0.204
1.274	0.911	0.070	0.211

Los datos presentan una mayor desviación de los datos en comparación a las pruebas realizadas con anterioridad, esto debido a que para estas pruebas se observó una mayor velocidad en el desplazamiento del volumen, ocasionando una mayor dificultad para la toma de datos. Sin embargo, la desviación es pequeña.

## Análisis de la varianza Flujo-Presión 180°

Tabla B.8: Análisis ANOVA flujo-presión apertura 180°

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	2.934	2.934	521.130	4.426 $10^{-20}$
Residuos	29	0.163	0.006		
Total	30	3.097			

La regresión realizada en esta prueba es efectiva para describir el fenómeno descrito, el valor del estadístico F es alto, esto se interpreta a que puede describir casi por completo el comportamiento de todos los datos.

---

### Sección B.2.

---

#### *Presión de detonación*

---

Para estas pruebas se observa una mayor desviación de los datos en cada sección, esto debido a que durante la realización de las pruebas el sonido sufre de efectos tales como la reflexión y la absorción ocasionada por los diferentes materiales que conformaban el espacio experimental, además de ruido exterior que pudo perturbar las pruebas. Este ruido se trató de eliminar lo más posible.

Sin embargo, se puede confirmar que la realización de las pruebas se realizó con la mayor precisión.

## Pruebas intensidad acústica detonación 0.002 $dm^3$

Tabla B.9: Intensidad acústica promedio y desviación estándar detonación 0.002  $dm^3$

Distancia (m)	Intensidad promedio en X (dB)	Intensidad promedio en Y (dB)	Intensidad promedio en Z (dB)	Desviación estándar X	Desviación estándar Y	Desviación estándar Z
0.2	100.911	99.989	101.078	0.641	0.448	0.821
0.4	98.178	97.833	99.467	0.479	0.166	0.364
0.6	97.333	96.500	97.811	0.229	0.316	0.499
0.8	96.167	96.067	97.133	0.495	0.497	0.456
1	95.844	95.667	96.011	0.658	0.300	0.851

## Sobrepresión de detonación $0.002 dm^3$

Tabla B.10: Sobrepresión de detonación y desviación estándar detonación  $0.002 dm^3$

Distancia ( $m$ )	Sobrepresión en X ( $kg cm^{-2}$ )	Sobrepresión en Y ( $kg cm^{-2}$ )	Sobrepresión en Z ( $kg cm^{-2}$ )	Desviación estándar Y	Desviación estándar Y	Desviación estándar Z
0.2	$2.26 \cdot 10^{-5}$	$2.04 \cdot 10^{-5}$	$2.31 \cdot 10^{-5}$	0.164	0.102	0.227
0.4	$1.65 \cdot 10^{-5}$	$1.59 \cdot 10^{-5}$	$1.92 \cdot 10^{-5}$	0.089	0.030	0.077
0.6	$1.50 \cdot 10^{-5}$	$1.36 \cdot 10^{-5}$	$1.59 \cdot 10^{-5}$	0.039	0.049	0.090
0.8	$1.31 \cdot 10^{-5}$	$1.30 \cdot 10^{-5}$	$1.47 \cdot 10^{-5}$	0.073	0.070	0.075
1	$1.26 \cdot 10^{-5}$	$1.24 \cdot 10^{-5}$	$1.29 \cdot 10^{-5}$	0.094	0.041	0.125

## Pruebas intensidad acústica detonación $0.004 dm^3$

Tabla B.11: Intensidad acústica promedio y desviación estándar detonación  $0.004 dm^3$

Distancia ( $m$ )	Intensidad promedio en X (dB)	Intensidad promedio en Y (dB)	Intensidad promedio en Z (dB)	Desviación estándar X	Desviación estándar Y	Desviación estándar Z
0.2	104.289	103.122	112.222	0.486	1.145	1.836
0.4	100.822	100.789	106.444	0.665	0.470	0.602
0.6	100.433	99.489	105.011	0.577	0.285	0.431
0.8	99.556	98.778	104.078	0.313	0.335	0.533
1	98.933	97.367	102.611	0.773	0.517	0.658

## Sobrepresión de detonación $0.004 dm^3$

Tabla B.12: Sobrepresión de detonación y desviación estándar detonación  $0.004 dm^3$

Distancia ( $m$ )	Sobrepresión en X ( $kg cm^{-2}$ )	Sobrepresión en Y ( $kg cm^{-2}$ )	Sobrepresión en Z ( $kg cm^{-2}$ )	Desviación estándar Y	Desviación estándar Y	Desviación estándar Z
0.2	$3.34 \cdot 10^{-5}$	$2.92 \cdot 10^{-5}$	$8.33 \cdot 10^{-5}$	0.183	0.381	1.687
0.4	$2.24 \cdot 10^{-5}$	$2.23 \cdot 10^{-5}$	$4.28 \cdot 10^{-5}$	0.168	0.120	0.298
0.6	$2.14 \cdot 10^{-5}$	$1.92 \cdot 10^{-5}$	$3.63 \cdot 10^{-5}$	0.142	0.062	0.174
0.8	$1.94 \cdot 10^{-5}$	$1.77 \cdot 10^{-5}$	$3.26 \cdot 10^{-5}$	0.068	0.067	0.191
1	$1.80 \cdot 10^{-5}$	$1.51 \cdot 10^{-5}$	$2.75 \cdot 10^{-5}$	0.152	0.086	0.204

### Sección B.3.

#### *Presión de deflagración en escenario de backfire*

Tabla B.13: Presión durante *backfire* y desviación estándar

Presión sensor 1 ( $kg\ cm^{-2}$ )	Presión sensor 2 ( $kg\ cm^{-2}$ )	Presión sensor 3 ( $kg\ cm^{-2}$ )	Desviación estándar sensor 1	Desviación estándar sensor 2	Desviación estándar sensor 3
2.357	2.308	2.319	0.011	0.010	0.078
2.303	2.230	2.259	0.027	0.063	0.056
2.265	2.127	2.152	0.026	0.076	0.028
2.163	2.047	2.044	0.028	0.077	0.033
2.071	1.962	1.965	0.057	0.073	0.059
2.012	1.980	1.926	0.095	0.069	0.066
1.955	1.996	1.986	0.086	0.055	0.111
2.033	1.963	1.980	0.052	0.085	0.044
1.961	1.895	1.834	0.018	0.082	0.108
1.857	1.836	1.766	0.102	0.086	0.073
1.808	1.761	1.671	0.088	0.086	0.024
1.785	1.651	1.595	0.090	0.059	0.036
1.720	1.566	1.494	0.076	0.077	0.054
1.664	1.526	1.446	0.078	0.060	0.055
1.568	1.469	1.418	0.047	0.043	0.042
1.523	1.412	1.373	0.041	0.045	0.045

## Presentaciones de resultados y avances

Los resultados y avances de esta tesis, se presentaron en:

- XLV Encuentro nacional de la AMIDIQ, 09 de mayo de 2024. Ixtapa/ Zihuatanejo, Guerrero “Análisis sobre las ondas de presión acústica generadas por detonaciones de gas hidrógeno”. Modalidad oral.
- XLVI Encuentro nacional de la AMIDIQ, 16 de mayo de 2025. San José del Cabo, Baja California Sur. “Análisis de velocidad en un evento de *backfire* en líneas de transporte de Gas de Brown acoplados a sistemas de producción experimentales”. Modalidad oral

# AMIDIQ

Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

## La Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A. C.

Otorga el presente

### RECONOCIMIENTO

a:

**Mayra Ruiz Reyes, Juan Carlos Pichardo Aponte, Isaac Haro Zamora, Erik Peña Dorantes, Emilio Morales López, Francisco Manuel Pacheco Aguirre**

Por la presentación del trabajo

**ANÁLISIS SOBRE LAS ONDAS DE PRESIÓN ACÚSTICA GENERADAS POR DETONACIONES DE GAS HIDRÓGENO**

En el área de **INGENIERÍA DE PROCESOS, SIMULACIÓN Y CONTROL** en modalidad **ORAL**

ID:476

Dr. Eduardo Salvador Pérez Cisneros  
Presidente  
Comité Organizador UAM

Dra. Nelly Ramírez Corona  
Presidenta  
Consejo Directivo de la AMIDIQ

Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia  
Presidente  
Comité Técnico

# AMIDIQ

Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

La Academia Mexicana de Investigación y Docencia  
en Ingeniería Química (AMIDIQ)

Otorga el presente

## RECONOCIMIENTO

a:

Juan Carlos Pichardo Aponte, Francisco Manuel Pacheco Aguirre, Mayra Ruiz Reyes, Dafne Yahaira Muñoz Sarmiento, Isaac Haro Zamora, Mónica López González, Marco Antonio Ruiz Gil

### Por la presentación del trabajo

ANÁLISIS DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD DURANTE UN EVENTO DE RETROCESO DE FLAMA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE DE GAS COMBUSTIBLE HIDRÓGENO Y OXIGENO ACOPLADOS A SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EXPERIMENTALES.

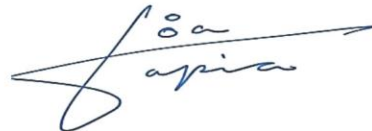
En el área de **INGENIERÍA DE PROCESOS, SIMULACIÓN Y CONTROL**, en la modalidad **ORAL**

ID: 306

Presentado en el XLVI Encuentro Nacional de la AMIDIQ, La Ingeniería Química ante los desafíos ambientales y energéticos, realizado en San José del Cabo, Baja California Sur, México, del 13 al 16 de mayo de 2025.



Dra Nelly Ramírez Corona  
Presidenta  
Consejo Directivo de la AMIDIQ  
y Comité Organizador



Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia  
Presidente  
Comité Técnico



## XLVI

Encuentro Nacional  
de la AMIDIQ

La Ingeniería Química ante los  
desafíos ambientales y energéticos

San José del Cabo, Baja California Sur, México. 13 al 16 de mayo de 2025

## Bibliografía

- [1] MathWorks.(2025).*MATLAB GUI*.Obtenido de <https://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>.
- [2] Goldin, A. Y., Magomedov, S.M., Faria, L.M. &Kasimov, A.R. (2024). *Study of a quantitative model for combustion waves: Flames, detonations, and deflagration-to-detonation transition*. Computers and fluids. 1-14.
- [3] Xu, Y. & Zhang, H. (2024). *Hydrogen explosion and detonation mitigation by water sprays: A mini review*. International Journal of Hydrogen Energy. 242-257.
- [4] Yang, P., Wang, T., Sheng, Y., Yu, Y., Li R., Su, B., Cheng, F., Qu, J., Deng, J. & Luo, Z. (2024). *Recent advances in hydrogen process safety: Deflagration behaviors and explosion mitigation strategies*. Process Safety and Environmental Protection, 303-316.
- [5] Babay, M.-A., Adar, M., Chebak, A., & Mabrouki, M. (2023). *Dynamic of gas generation in porous electrode alkaline Electrolysis Cells: An investigation an optimization using machine learning*. Energies.
- [6] CONAHCYT. (2023). *Reservas de Crudo en México*. Obtenido de <https://energia.conacyt.mx/planeas/hidrocarburos/reservas-crudo>.
- [7] Haoran, C., Xia, Y., Wei, W., Yongzhi, Z., Bo, Z., & Leiqi, Z. (2023). *Safety and efficiency problems of hydrogen production from alkaline water electrolyzers driven by renewable energy sources*. Hydrogen Energy.
- [8] Matheus , H. A., Da Cruz, A., Etancelin, M., Marias, F., Renaume, J.-M., Sochard-Reneume, S., & Serra, S. (2023). *Dynamic modelling of an alkaline water electrolysis system and optimization of its operating parameters for hydrogen production*. Hydrogen Energy, 12982-12999
- [9] Niroula, S., Chaudhary, C., Subedi, A., & Thapa, B. S. (2023). *Parametric modelling and optimization of alkaline electrolyzer for the production of green hydrogen*. University Scholar Conference: Engineering and Innovation, 1-12.
- [10] Pacheco Aguirre, F. M., Ruiz Reyes, M., García Alvarado, M.A. & Rodríguez Castillo, E.R. (2023) *Mathematical modeling for a monopolar-dry cell alkaline electrolyzer, an appraisal on electric and thermodynamics effects for laboratory scale*. Brazilian Journal of Chemical Engineering.

- [11] Organización Meteorológica Mundial. (10 de octubre de 2022). *El cambio climático pone en riesgo la seguridad energética*. Obtenido de <https://wmo.int/es/media/el-cambio-climatico-pone-en-riesgo-la-seguridad-energetica>.
- [12] Robinson, D., (28 de junio de 2022). *Crisis energéticas actuales y transición energética*. Obtenido de El País: <https://agendapublica.elpais.com/noticia/18073/crisis-energeticas-actuales-transicion-energetica>.
- [13] Molina Aguado, R., Casteleiro Roca, J.L., Jove Pérez, E., Zayas Gato, F., Quintián Pardo, H. & Calvo Rolle, J. L. (2021). *Hidrógeno y su Almacenamiento. El futuro de la energía eléctrica*. Coruña: Universidad de Coruña.
- [14] Rivera, F. F., Pérez, T., Castañeda, L. F., & Nava, J. L. (2021). *Mathematical modeling and simulation of electrochemical reactors: A critical review*. Chemical Engineering Science.
- [15] Tingas, E.A. (2021). *Computational analysis of effect of hydrogen peroxide addition on premixed laminar hydrogen/air flames*. Elsevier. 1-13.
- [16] Shirvill, L. C., Roberts, T. A., Royle, M., Willoughby, D. B., & Sathiah, P. (2019). *Experimental study of hydrogen explosion in repeated pipe congestion-Part 1: Effects of increase in congestion*. Hydrogen Energy.
- [17] Clemente Jul, M., Sánchez Delgado, M. & Rodríguez, L. (2018). *Modelado de Sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables*. Real Academia de Doctores de España, 19-36.
- [18] Konoplev, V., Sarbaev, V., & Melnikov, Z. (2018). *The main aspects of safety of hydrogen energy in relation to the motor transport process on gas engine fuels*. Transportation Research Procedia.
- [19] López, M. A. Maldonado, G. Y., Guardado, P. J. A. & Gallardo H. S., (8 de octubre de 2018). *Determinación del poder calorífico de combustibles líquidos y sólidos*. Querétaro, México: Simposio de Metrología.
- [20] Aspden, A.J. (2017). *A numerical study of diffusive effects in turbulent lean premixed hydrogen flames*. Newcastle University.
- [21] Dean, A., Voss, D. & Dragulic, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. (Segunda ed.) Nueva York: Springer.
- [22] Chapra, S.C. & Canale, R.P. (2015). *Métodos numéricos para ingenieros*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- [23] Ida, N. (2015). *Engineering Electromagnetics*. Nueva York: Springer.
- [24] Valencia Botero, M. J. & Cardona Alzate, C.A. (2013). *Análisis del ciclo de vida para la producción de hidrógeno como combustible del futuro*. Revista Cubana de Química, 165-179.

- [25] Diario Oficial de la Federación. (9 de enero de 2012). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SCT/2011 Para el transporte de materiales peligrosos. *Listado de sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados*. Ciudad de México, México.
- [26] Turton, R., Baile, R.C., Whithing, W. B., Shaeiwitz, J. A. & Bhattacharyya, D. (2012). *Analysis, Syntesis , and Design of Chemical Processes*. (Cuarta ed.). Michigan: Prentice Hall.
- [27] Ursúa, A., & Sanchis, P. (2012). *Static-dynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolyser*. Hydrogen Energy. 18598-18614.
- [28] Atkins, P., & De Paula, J. (2010). *Physical Chemistry*. Nueva York: W.H. Freeman & Company.
- [29] Chang, R. (2010). *Química*. (Décima ed.). Ciudad de México: McGraw Hill.
- [30] Mendenhall, W., Beaver, R. J, & Beaver, B. M. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*.(Treceava ed.). Ciudad de México: Cengage Learning.
- [31] Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2009). *Fundamentos de Física* (Octava ed., Vol I). Ciudad de México: Grupo Editorial Patria.
- [32] Lefrou, C., Fabry, P., & Poignet, J.-C. (2009). *Electrochemistry. The Basics with examples*. Nueva York: Springer.
- [33] Sears, F., Zemansky, M., Freedman, R.A., Young, H. D., & Ford. A. L. (2009). *Física Universitaria con Física Moderna*. (Vol. II). Naucalpan de Juárez: Pearson Educación de México.
- [34] Barragan Guerrero, D.O., (2008). *Manual de interfaz de usuario en Matlab*. Ecuador
- [35] Gutiérrez Pulido, H. & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- [36] Mortimer, R.G. (2008). *Physical Chemistry*. Tennessee: Elsevier.
- [37] Linares Hurtado, J. I., & Moratilla Soria, B. Y. (2007). *El hidrógeno y la Energía*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.
- [38] Smith, J.M., Van Ness, H.C., & Abbott, M.M. (2007). *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. (Séptima ed.). Ciudad de México: McGraw Hill.
- [39] Engel, T., & Reid, P. (2006) *Introducción a la Fisicoquímica: Termodinámica*. Naucalpan de Juárez: Pearson Education de México S.A. de C.V.
- [40] Jensen, C., Helsel, J. D. & Short, D. R. (2004). *Dibujo y diseño en ingeniería*. (Sexta ed.) McGraw Hill.
- [41] Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (17 de abril de 2002). Norma Oficial Mexicana NOM-011-STPS-2001. *Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido*. Ciudad de México, México.

- [42] Wangsness, R. K. (2001). *Campos Electromagnéticos*. Ciudad de México: Editorial Limusa S.A. de C.V.
- [43] Turno Sierra, E. (1999). *NTP 379: Productos inflamables: variación de los parámetros de peligrosidad*. España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- [44] Spivak, M. (1996). *Cálculo infinitesimal*. (Segunda ed.). Ciudad de México: Editorial Reverté.
- [45] Diario Oficial de la Federación (1994). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-STPS-1993 Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido*.
- [46] Crane. (1992). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. México: McGraw Hill.
- [47] Bolaños Baldía , C. F. (s.f.) *Energética del Hidrógeno. Contexto, estado actual y perspectiva del futuro*.
- [48] Millet, P. (s.f) *Fundamental of Water Electrolysis*.