



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO TIPO
SECA MEDIANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS DETERMINANDO EL NIVEL DE
PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: CRISTOPHER VINICIO SANISACA BRITO
SANTIAGO JAVIER MINCHALA URUCHIMA
TUTOR: ING. FREDY GONZALO TACURI MOSCOSO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Cristopher Vinicio Sanisaca Brito con documento de identificación N° 0107530479 y Santiago Javier Minchala Uruchima con documento de identificación N° 0106965247; manifestamos que:

Somos autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 17 de febrero del 2022

Atentamente,

Cristopher Vinicio Sanisaca Brito

0107530479

Santiago Javier Minchala Uruchima

0106965247

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros Christopher Vinicio Sanisaca Brito con documento de identificación N° 0107530479 y Santiago Javier Minchala Uruchima con documento de identificación N° 0106965247, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Evaluación del comportamiento de una celda de hidrógeno tipo seca mediante la adquisición de datos determinando el nivel de producción de hidrógeno”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 17 de febrero del 2022

Atentamente,

Cristopher Vinicio Sanisaca Brito

0107530479

Santiago Javier Minchala Uruchima

0106965247

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fredy Gonzalo Tacuri Moscoso con documento de identificación N° 0103369542, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO TIPO SECA MEDIANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS DETERMINANDO EL NIVEL DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO, realizado por Cristopher Vinicio Sanisaca Brito con documento de identificación N° 0107530479 y por Santiago Javier Minchala Uruchima con documento de identificación N° 0106965247, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 17 de febrero del 2022

Atentamente,



Ing. Fredy Gonzalo Tacuri Moscoso, MSc.

0103369542

DEDICATORIA

El presente proyecto les dedico a mis padres Galo Sanisaca y Luz Brito por el apoyo incondicional que han tenido a través de los años en las tomas de mis decisiones.

Del mismo modo va mis abuelitos Elsa Flores, Galo Sanisaca, Elvia Castro y Leoncio Brito, por estar en todos mis momentos, por brindarme el cobijo cuando más lo necesitaba.

A mi novia Rosanna Vargas por brindarme el apoyo emocional en mis momentos en los que necesitaba y por las palabras de aliento y superación que siempre me brinda.

Y de manera especial este proyecto va dedicado a mi gran amigo Freddy Miguel Ochoa Jiménez (+), que a pesar de las circunstancias siempre tenía la fuerza y valentía para enfrentarse a todo, por todos los momentos buenos y malos que pasamos y sobre todo por la motivación para seguir adelante y no rendirme.

DEDICATORIA

El presente proyecto les dedico a mi madre Ana Uruchima por su gran apoyo incondicional en todas mis ideas y decisiones, por su paciencia, por toda su confianza, por haber creído en mí y por sobre todo nunca permitir que me rinda fácilmente.

Así mismo se lo dedico a mis hermanas Gabriela Minchala y Jessica Minchala por confiar y apoyarme en cada momento.

De la misma manera a aquellas amistades que me brindaron su conocimiento y apoyo cuando lo necesite Freddy Ochoa, Carlos Duta, Stephanie Ruiz, David Cabrera, Mateo Echeverria, David Peñafiel, David Peralta y demás allegados que de una u otra forma generaron inspiración y confianza para seguir y culminar mi carrera.

RESUMEN

El siguiente proyecto está enfocado a la evaluación del comportamiento de una celda de hidrógeno tipo seca mediante la adquisición de datos determinando el nivel de producción de hidrógeno, con la finalidad de establecer un rango de producción de hidrógeno idóneo en base al valor de amperaje suministrado a la celda.

El capítulo uno se formaliza un estudio bibliográfico sobre las celdas de hidrógeno y su desenvolvimiento en la industria automotriz, además de señalar sus avances y desventajas, su métodos de producción y almacenamiento. Asimismo, se investigó el funcionamiento y características de las celdas de hidrógeno según su tipo.

En el segundo capítulo, se procede a iniciar al estudio práctico de la celda de hidrógeno tipo seca, de modo que se miden las variables de entrada y salida con la finalidad de generar una base de datos que visualice el comportamiento de estas en un tiempo establecido. Se detalla la construcción de la maqueta que contendrá todos elementos para este proyecto. Además de mostrar la programación, diseño y funcionamiento del software que procesara las señales obtenidas por sensores para así continuamente presentar los valores de generación de hidrógeno en pantalla.

En el último capítulo se presenta el análisis y resultados de los ensayos en la celda de hidrógeno con diferentes soluciones con el fin de visualizar el comportamiento de variables como temperatura, corriente y sobre todo como estas intervienen en el nivel de producción de hidrógeno.

ABSTRACT

The following project is focused on the evaluation of the behavior of a dry type of hydrogen cell by the acquisition of data determined the level of hydrogen production, with the purpose of establishing a range of hydrogen production suitable for the improvement of the combustion and emissions of an internal combustion engine.

In chapter one, a bibliographic study on hydrogen cells and their development in the automotive industry is formalized, in addition to pointing out their advances and disadvantages. Likewise, the operation and characteristics of hydrogen cells according to their type were investigated.

In the second chapter, we go ahead to the practical study of the dry type of hydrogen cell, so that the input and output variables are measured to generate a database to compare with the results obtained from this project. The programming, design and operation of the software that presents the hydrogen generation values on the screen are detailed; in addition, general information of each part, its operation, type, and application is detailed.

The last chapter presents tests in the hydrogen cell with different solutions to visualize the behavior of variables such as temperature, current consumption and how these intervene in the production of hydrogen.

INDICE

RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
INTRODUCCION	1
PROBLEMA.....	2
ANTECEDENTES	2
IMPORTANCIA Y ALCANCE.....	3
DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA.....	4
OBJETIVOS	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	6
1.1. Introducción	6
1.2. El Hidrógeno	6
1.2.1. Propiedades de hidrógeno.....	7
1.3. Producción de hidrógeno.....	9
1.4. Métodos de producción de hidrógeno	9
1.4.1. Conversión química.....	10
1.4.2. Termolíticos	12
1.4.3. Biológicos	12

1.4.4.	Fotónicos.....	12
1.4.5.	Electrólisis.....	13
1.5.	Almacenamiento del hidrógeno en función de su estado.....	15
1.5.1.	Almacenamiento de hidrógeno líquido.....	17
1.5.2.	Almacenamiento de hidrógeno comprimido.....	17
1.5.3.	Almacenamiento de hidrógeno sólido	19
1.6.	Seguridad y Normalización.....	19
1.7.	Celdas de combustible.....	21
1.8.	Tipos de celdas de combustibles	22
1.8.1.	Celdas de ácido fosfórico (PAFC)	23
1.8.2.	Celda de carbonato fundido (MCFC)	24
1.8.3.	Celdas de polímero sólido (PEM).....	26
1.8.4.	Celdas alcalinas (AFC).....	27
1.8.5.	Celda de óxido sólido (SOFC).....	29
1.8.6.	Tabla resumen de los tipos de celdas de combustibles	30
1.9.	Celdas de hidrógeno.....	31
1.9.1.	Tipos de celdas de hidrógeno.....	32
1.10.	Antecedentes investigativos	36
2.	Capítulo II. DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO DE UNA CELDA DE TIPO SECA MEDIANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS	39

2.1.	Introducción	39
2.2.	Metodología	39
2.2.1.	Recolección de información	39
2.2.2.	Desarrollo del proyecto.....	40
2.3.	Diseño de soporte para la celda.....	40
2.3.1.	Composición de la celda de hidrógeno	43
2.4.	Diseño de software de medición de ppm de hidrógeno	45
2.4.1.	Selección de sensor	45
2.4.2.	Cuantificación de la cantidad de hidrógeno obtenido.....	47
2.5.	Adquisición y visualización de datos.....	51
2.6.	Componentes de la maqueta.....	53
2.6.1.	Mesa de trabajo de la maqueta.....	54
2.6.2.	Software de medición de ppm de hidrógeno.....	55
2.7.	Funcionamiento de la maqueta.....	59
2.7.1.	Precauciones	60
2.8.	Diseño experimental.....	61
2.8.1.	Factores de entrada	61
2.8.2.	Factores de control.....	62
2.8.3.	Factores de ruido.....	62
2.8.4.	Factores de respuesta	62

2.8.5.	Rango de operación de los factores	62
2.9.	Procedimiento de medición.....	63
2.9.1.	Selección del electrolito.....	63
2.9.2.	Materiales y herramienta.....	64
3.	CAPITULO 3: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	66
3.1.	Introducción	66
3.2.	Recopilación de datos para el estudio estadístico	66
3.3.	Valores obtenidos a carga lenta.....	66
3.3.1.	Primera corrida experimental a carga lenta	66
3.3.2.	Segunda corrida experimental a carga lenta	69
3.3.3.	Tercera corrida experimental a carga lenta	71
3.4.	Valores obtenidos a carga rápida	73
3.4.1.	Primera corrida experimental a carga rápida	73
3.4.2.	Segunda corrida experimental a carga rápida	75
3.4.3.	Tercera experimental a carga rápida	77
3.5.	Valores obtenidos a pulsos de carga	80
3.5.1.	Primera corrida experimental a pulsos de carga	80
3.5.2.	Tercera corrida experimental a pulsos de carga.....	84
3.6.	Resultados	86
3.6.1.	Diseño experimental a carga lenta	86

3.6.2. Diseño experimental a carga rápida.....	86
3.6.3. Diseño experimental a pulsos de carga.....	87
4. Conclusiones y recordaciones.....	89
4.1. Conclusiones	89
4.2. Recomendaciones.....	90
Referencias.....	92
Bibliografía	97
ANEXOS	99

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas del hidrógeno.....	7
Tabla 2 Propiedades químicas del hidrógeno	8
Tabla 3 Propiedades termodinamicas del hidrógeno	8
Tabla 4. Eficiencia energética de la electrolisis.....	14
Tabla 5 Clasificacion de diferentes tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno	18
Tabla 6 Normativas referentes al manejo del hidrógeno	19
Tabla 7 Ventajas y desventajas de la celda de ácido fosfórico (PAFC)	23
Tabla 8 Ventajas y desventajas de la celda de carbonato fundido (MCFC)	25
Tabla 9 Ventajas y desventajas de la celda de polímero sólido (PEM).....	26
Tabla 10 Ventajas y desventajas de la celda alcalina (AFC).....	28
Tabla 11 Ventajas y desventajas de la celda de oxido sólido (SOFC).....	29
Tabla 12 Características de las diferentes celdas de combustible.....	30
Tabla 13 Parametros de la celda de hidrógeno de tipo seca	44
Tabla 14 Características de los sensores cuantificadores de hidrógeno	46
Tabla 15 Relacion entre la resistencia y las particulas de hidrógeno medidas	48
Tabla 16 Elementos de la zona A del panel de control del software	55
Tabla 17 Rangos de operación de los factores de estudio	62
Tabla 18 Materiales y herramientas	64
Tabla 19 Valores estadísticos de la primera corrida experimental a carga lenta.....	66
Tabla 20 Valores estadísticos de la segunda corrida experimental a carga lenta	69
Tabla 21 Valores estadísticos de la tercera corrida experimental a carga lenta.....	71
Tabla 22 Valores estadísticos de la primera corrida experimental a carga rápida.....	73

Tabla 23 Valores estadísticos de la segunda corrida experimental a carga rápida	75
Tabla 24 Valores estadísticos de la tercera corrida experimental a carga rápida	77
Tabla 25 Valores estadísticos de la primera corrida experimental a pulsos de carga.....	80
Tabla 26 Valores estadísticos de la segunda corrida experimental a pulsos de carga	82
Tabla 27 Valores estadísticos de la tercera corrida experimental a pulsos de carga	84

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de los procesos de conversión química.....	11
Figura 2. Densidad energética por unidad de volumen	16
Figura 3. Densidad energética por unidad de peso	16
Figura 4. Celda de combustible	22
Figura 5. Esquema de una celda de ácido fosfórico (PAFC).....	24
Figura 6. Esquema de una celda de carbonato fundido (MCFC).....	26
Figura 7. Esquema de una celda de polímero sólido (PEM)	27
Figura 8. Esquema de una celda alcalina (AFC)	28
Figura 9. Esquema de una celda de óxido sólido (SOFC).....	30
Figura 10. A) Celda de hidrógeno de tipo húmeda, B) Esquema del funcionamiento de una celda de hidrógeno de tipo húmeda.....	33
Figura 11. Disposiciones de las celdas de tipo húmeda (izquierda) y tipo seca (derecha).....	34
Figura 12. Esquema de funcionamiento la celda de hidrógeno de tipo seca	35
Figura 13. Modelado de los elementos del generador de hidrógeno	41
Figura 14. Estructura de los elementos del generador de energía	42
Figura 15. Ensamble final de los elementos del generador de hidrógeno	43
Figura 16. Resultado final del ensamblado del soporte para la celda de hidrógeno.....	43
Figura 17. Curva de sensibilidad del sensor MQ-8.	48
Figura 18. Curva de producción ppm de hidrógeno en función de R_s/R_o	50
Figura 19. Estructura del circuito del sensor MQ-8.....	50
Figura 20. Placa Arduino uno	52
Figura 21. Panel de control de software de medición de ppm de hidrógeno.	53

Figura 22. Sistema de producción de hidrógeno montado en la estructura.	54
Figura 23. Distribución de las áreas de trabajo en la maqueta	55
Figura 24. Componentes con respecto a la zona B del tablero de control del software.	57
Figura 25. Elementos de visualización del nivel de producción de hidrógeno.....	58
Figura 26. Tabla de control de datos registrados.	59
Figura 27. Dispersión de PPM vs Tiempo (primera corrida experimental a carga lenta)	68
Figura 28. Dispersión de PPM vs Amperaje (primera corrida experimental a carga lenta)	69
Figura 29. Dispersión de PPM vs Tiempo (segunda corrida experimental a carga lenta).....	70
Figura 30. Dispersión de PPM vs Amperaje (segunda corrida experimental a carga lenta)	71
Figura 31. Dispersión de PPM vs Tiempo (tercera corrida experimental a carga lenta).....	72
Figura 32. Dispersión de PPM vs Amperaje (tercera corrida experimental a carga lenta).....	73
Figura 33. Dispersión de PPM vs Tiempo (primera corrida experimental a carga rápida)	74
Figura 34. Dispersión de PPM vs Amperaje (primera corrida experimental a carga rápida).....	75
Figura 35. Dispersión de PPM vs Tiempo (segunda corrida experimental a carga rápida)	76
Figura 36. Dispersión de PPM vs Amperaje (segunda corrida experimental a carga rápida)	77
Figura 37. Dispersión de PPM vs Tiempo (tercera corrida experimental a carga rápida).....	79
Figura 38. Dispersión de PPM vs Amperaje (tercera corrida experimental a carga rápida)	79
Figura 39. Dispersión de PPM vs Tiempo (primera corrida experimental a pulsos de carga)	81
Figura 40. Dispersión de PPM vs Amperaje (primera corrida experimental a pulsos de carga). 81	
Figura 41. Dispersión de PPM vs Tiempo (segunda corrida experimental a pulsos de carga) ...	83
Figura 42. Dispersión de PPM vs Amperaje (segunda corrida experimental a pulsos de carga) 83	
Figura 43. Dispersión de PPM vs Tiempo (tercera corrida experimental a pulsos de carga).....	85
Figura 44. Dispersión de PPM vs Amperaje (tercera corrida experimental a pulsos de carga) ..	85

Figura 45. Dispersión de PPM a carga lenta vs Tiempo.....	86
Figura 46. Dispersión de PPM a carga rápida vs Tiempo	87
Figura 47. Dispersión de PPM a pulsos de carga vs Tiempo	88

INTRODUCCION

La propuesta de investigación "Evaluación del comportamiento de una celda de hidrógeno tipo seca mediante la adquisición de datos determinando el nivel de producción de hidrógeno" tiene como enfoque principal en la proporción de información acerca de la producción de hidrógeno, el modo de uso de la celda de tipo seca y la implementación de la electrónica.

Este estudio permitirá revelar el nivel de producción de hidrógeno según la intensidad administrada a la celda tipo seca, y a la vez, establecer los rangos de intensidad y voltaje que permitan obtener un hidrógeno a niveles adecuados para trabajar en un motor de combustión interna.

PROBLEMA

En Ecuador, durante la última década, el parque automotor ha tenido un crecimiento hasta de 1.4 millones de vehículos según datos de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE, 2021), lo cual ha tenido una repercusión en la demanda de combustible. En 2019 la empresa pública Petroecuador señaló que a finales de año se despachó un total de 1.258 millones de galones de combustible para el sector automotriz (Pacheco, 2020). Lo cual representa cerca del 60% del total de combustibles ingresados al país.

Por lo tanto, el crecimiento exponencial de vehículos tiene como efecto el incremento de emisiones contaminantes. En el 2020, Ecuador reportó que generó cerca del 0.15% de emisiones de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial (República del Ecuador, 2019). Cabe mencionar que en 2018 el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAE) reportó la emisión de 41,116 megatoneladas de CO₂ y en el año 2020 la emisión de 33,279 megatoneladas de CO₂, indicando una reducción del 19.06% de emisión de megatoneladas de CO₂ con respecto al 2018 (Arroyo y Miguel, 2019) (Datosmacro, 2020). Esto se debe a gran parte por el paro de producción y movimiento vehicular en el país a causa del COVID-19, sin embargo, en la actualidad muchas de las actividades causantes de la emisión de (GEI) se han recuperado de modo que se espera un nuevo incremento de GEI. Esto ha llevado a la investigación de contramedidas a corto y largo plazo que sean accesibles tanto tecnológicamente como económica.

ANTECEDENTES

A nivel mundial, más del 80% del suministro de energía proviene de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y el carbón), donde el petróleo figura a un tercio de las necesidades energéticas globales (Bakhtiari, 2004). Fernández y Jusmet (2010) señalan que en los años setenta y en los primeros años ochenta dominó la preocupación por la limitación (y aún más la extrema concentración) de las reservas de petróleo (que tanto entonces como ahora –aunque con una

pérdida de peso relativo— es la principal fuente energética): eran los años de los shocks del petróleo que tanto afectaron a las economías ricas.

Actualmente la preocupación por la limitación y el futuro agotamiento de las reservas de combustible varían contantemente según las tendencias en los precios. En 2005 se tenía en conocimiento que la producción de petróleo a nivel mundial ha tenido un crecimiento del 0.1% anualmente (Fernández et al., 2010). Hoy, conocer el estado sobre el pico de petróleo requiere conocer el total las reservas mundiales, el consumo a futuro y la tasa de reposición de las reservas, estos tres factores no son conocidos con exactitud debido a que los países de principal producción mantienen la información sobre el total de sus reservas y producción bajo secreto.

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) a nivel mundial, desde el 2010, las emisiones de gases causantes de calentamiento global son más inciertas y variables, hasta el 2018 se ha registrado un crecimiento con un promedio anual del 1.3%. En 2019, el aumento fue más pronunciado alcanzando hasta un 2.6% a raíz de los incendios forestales registrados en dicho año.

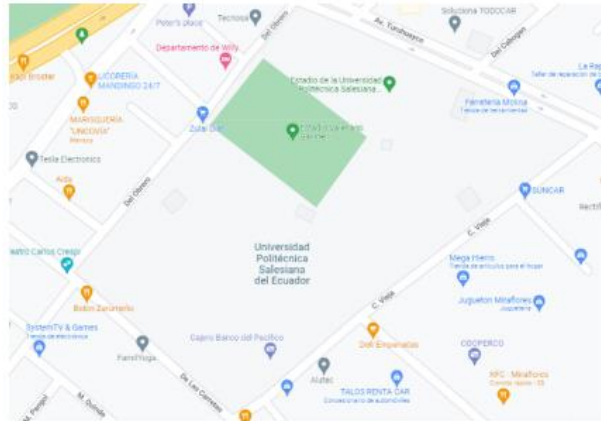
IMPORTANCIA Y ALCANCE

El presente proyecto beneficiará al grupo de investigación de eficiencia energética y contaminación ambiental, ya que se busca establecer los niveles de producción de hidrógeno adecuados y que permitan una mejora en la combustión y en la emisión de gases contaminantes.

Por otro lado, la búsqueda de fuentes alternativas a los combustibles fósiles contribuye de gran manera a la reducción de gases contaminantes que se presentan en la ciudad de Cuenca, lo cual tiene un gran beneficio hacia la sociedad en general.

DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA

La delimitación geográfica será en la facultad de ingeniería automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de la ciudad de Cuenca, campus el Vecino, Calle Vieja 12-30 y Elia Liut.



El tiempo estimado para el diseño y elaboración de la maqueta será de 6 meses, dando inicio una vez se haya dado la aprobación del proyecto.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Evaluar el comportamiento de una celda de hidrógeno tipo seca mediante adquisición de datos determinando el nivel de producción de hidrógeno.

Objetivos específicos

- Analizar las aplicaciones del hidrógeno mediante revisión bibliográfica teniendo como enfoque en la reducción de los gases contaminantes.
- Determinar el nivel de generación de hidrógeno de una celda de tipo seca mediante la adquisición de datos.
- Analizar los resultados obtenidos mediante estadística descriptiva.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1.Introducción

En el siguiente capítulo se plantea la revisión bibliográfica sobre el hidrógeno, sus propiedades y características, con el fin de dar una introducción a los métodos de producción y almacenamiento del hidrógeno, además en base a una exploración de antecedentes y proyectos donde se implementan celdas de hidrógeno de tipo seca como un apoyo para la combustión de un motor, de modo que se establezca la importancia del estudio del hidrógeno según los resultados.

1.2. El Hidrógeno

El hidrógeno (H) es un elemento químico descubierto en 1766 por el físico Henry Cavendish; tiene como representación en la tabla periódica con el símbolo *H*, cuenta con características inodoras, incoloras, insípidas, no metálicas y altamente inflamables, su masa atómica es de 1.00784 *u* (Hurtado y Soria, 2007). Además, es el elemento más abundante en el planeta, sin embargo, el hidrógeno elemental es escaso, por lo que se obtiene de manera industrial por medio de hidrocarburos e incluso por electrolisis del agua. Su aplicación es diversa, esta destaca en el refinamiento de combustibles fósiles, producción de amoníaco, en soldadura y muchas más.

Específicamente no es un combustible, sin embargo tiene propiedades físicas, revisar , y químicas, ver , que lo diferencian de los demás combustibles como su densidad, octanaje, velocidad de quemado, y más características que lo colocan como el combustible del futuro.

El desarrollo del hidrógeno y su aplicación como combustible tiene una íntima relación con el respeto al medio ambiente, debido a que en la actualidad la demanda energética busca o prioriza la mejora en la utilización de los recursos y, además, se centra en la utilización de energías no contaminantes. En el 2019, la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2019) proclama al hidrógeno como fuente de energía imprescindibles para la descarbonización a mediano y largo

plazo, debido a su cero emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de modo que se postula como una alternativa para la limpia de carbono en áreas como transporte y la industria.

1.2.1. Propiedades de hidrógeno

Una vez presentada una breve explicación del hidrógeno, se procede a detallar algunas de sus propiedades más importantes en las cuales reflejan al hidrógeno como fuente sustancial de energía:

Tabla 1

Propiedades del físicas del hidrógeno

Propiedad	Valor	Unidad
Inodoro, incoloro e insaboro		
Estado originario	Gaseoso	
Estructura cristalina	Hexagonal	
Densidad en estado líquido	0,0708	kg/m ³
Volumen específico en estado líquido	0,014	m ³ /kg
Volumen específico en estado gaseoso	11,9	m ³ /kg
Temperatura crítica	-239,8	°C
Presión crítica	1,293*10 ⁶	Pa
Optima conductividad calorífica		
Relación de expansión	1:848	

Nota. Fuente: El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado

Tabla 2

Propiedades del químicas del hidrógeno

Propiedad	Valor	Unidad
Peso atómico	100974	uma
Estado de oxidación	+1, -1	
Radio atómico	53	pm
Radio covalente	37	pm
Radio iónico	208	pm
Radio medio	25	pm
Configuración electrónica	1s ¹	
Reacción con gran parte de elementos de la tabla periódica		

Nota. Fuente: El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado

Tabla 3

Propiedades del termodinámicas del hidrógeno

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad a condiciones normales	0,0000899	g/cm ³
Temperatura de fusión	14,01	K
Temperatura de ebullición	20,28	K
Calor de fusión	0,117	kJ/mol
Calor de evaporación	0,904	kJ/mol
Capacidad térmica molar	14,235	J/(K*mol)

Volumen molar	14,1	cm ³ /molécula
		gramo

Nota. Fuente: El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado

1.3. Producción de hidrógeno

Debido a que el hidrógeno no se halla de forma abundante en la naturaleza es necesario generarlo a partir de otros elementos por medio de procesos de transformación. La Agencia Internacional de Energía (AIE, 2021) señala que en la actualidad existe un gran número de métodos para la obtención de hidrógeno a nivel industrial donde se puede clasificar según la materia prima para su producción:

- Por recursos fósiles.
- Por recursos renovables.

Al presente, la producción mundial de hidrógeno, el 96% se genera a partir de combustibles fósiles (produce dióxido de carbono como subproducto) donde un 72% es consumido por la industria química y petrolera. El 4% restante es obtenido por medio de electrolisis de agua lo cual produce una gran pureza del gas. (Hurtado y Soria, 2007)

1.4. Métodos de producción de hidrógeno

Los métodos de obtención de hidrógeno son numerosos debido a su producción industrial, estos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Conversión química,
- Termolíticos,
- Electrolíticos,
- Biológicos,

- Fotónicos.

1.4.1. Conversión química.

Dicho proceso de obtención de hidrógeno es muy amplio, además que cuenta con la ventaja de aplicarse tanto a combustibles fósiles como renovables, sin embargo, el método por conversión química puede generar CO₂ de modo que durante su implementación se debe considerar la captura de tal gas. La conversión química se subdivide en tres métodos:

1.4.1.1. Reformado

El proceso de reformado con vapor de agua o conocido como Steam Methane Reforme (SMR) es uno de los procesos más usados y factibles que se aplicara en hidrocarburos y alcoholes. Su rendimiento alcanzado esta entre 70- 90%. (Asensio, 2007)

La oxidación parcial (POX, “Partial Oxidation”), es un proceso exotérmico que se realiza a temperaturas entre 475° y 800° C. Consiste en la oxidación incompleta de un hidrocarburo pesado, donde el agente oxidante debe hallarse en ausencia de vapor de agua. La eficiencia del proceso es de alrededor del 70% en producciones industriales. (Hurtado et al., 2007)

El reformado autotérmico (ATR, “Auto-Thermal Reforming”) es una combinación de los procesos SMR y POX, de modo que el calor sobrante de la oxidación parcial se utiliza para cumplir las necesidades del reformado con vapor de agua. La eficiencia del reformado autotérmico es similar al método de oxidación parcial.

1.4.1.2. Proceso de pirólisis

Hurtado et al., (2007) indica que el proceso de pirólisis consiste en la descomposición de un combustible sólido mediante la acción de calor (entre 450°C para biomasa y 1200°C para carbón) en ausencia de oxígeno. Además, durante la producción de hidrógeno es esencial controlar la

reacción para obtener gases de CO y H_2 , con el fin de acondicionarlos como ya se ha mencionado en procesos anteriores.

1.4.1.3. Proceso de Gasificación

El proceso de gasificación consiste en combustionar un sustrato carbonoso para conseguir un gas combustible. El coste de producción de hidrógeno es mal alto que el obtenido por el método SMR, además de que el nivel de producción de H_2 es de tan solo un 8-14% en volumen. (Delgado y Aznar, 1997)

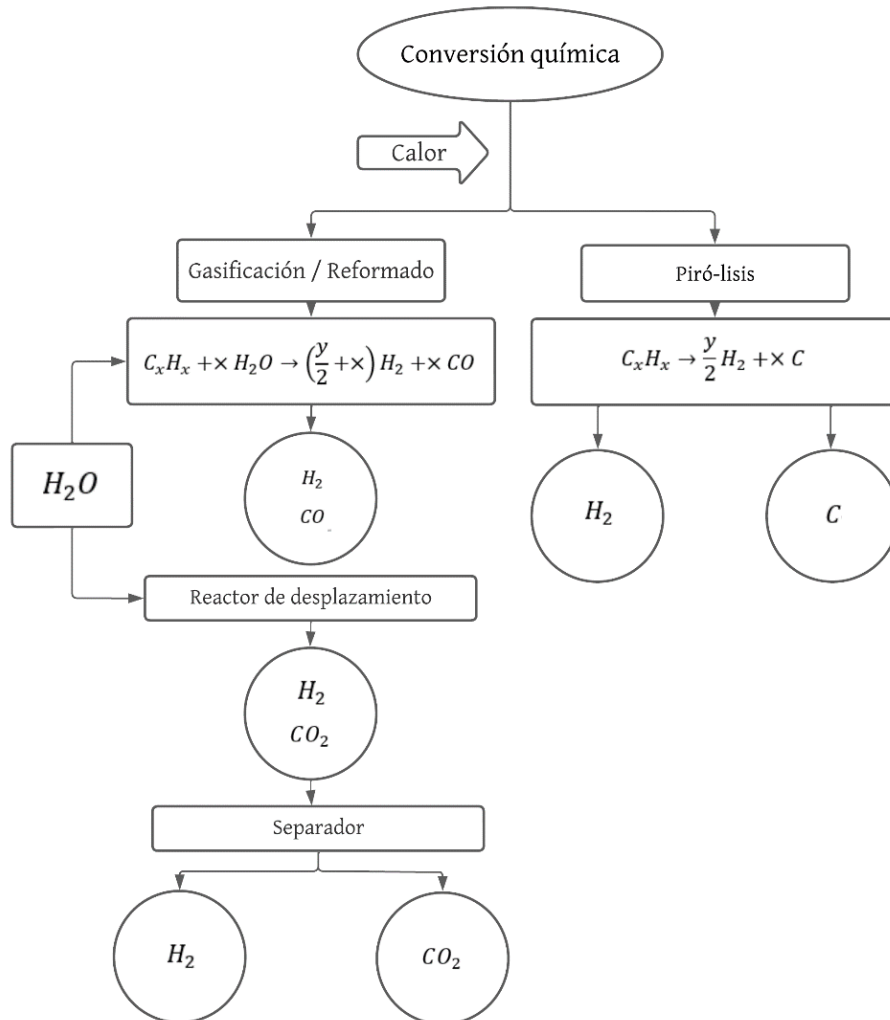


Figura 1. Esquema de los procesos de conversión química

Fuente. Hurtado, J. I. L., & Soria, B. Y. M. (2007). El hidrógeno y la energía. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.

1.4.2. Termolíticos

Los procesos de termólisis implican la extracción del hidrógeno mediante la aplicación de calor, es decir, que todo método que implementa a su desarrollo calor de fuentes externas se considera un método termolítico, bajo esta definición procesos como el reformado, la gasificación y la pirólisis se pueden entender como familia del método.

1.4.3. Biológicos

La fermentación alcohólica es un proceso donde ocurre una biorreacción la cual degrada hidratos de carbono simples (azúcares) o complejos (almidón o celulosa) en alcohol y dióxido de carbono. Para la producción de hidrógeno, se procede a emplear un reformado con vapor de manera que al ejecutar el desplazamiento se llega a obtener un nivel de hidrógeno.

La fermentación o digestión anaerobias es un proceso de fermentación microbiana producida a temperaturas entre los 30° y 80° C en ausencia de oxígeno. El hidrógeno es generado a partir de la mezcla de gases de CO_2 , CH_4 (biogás) y H_2S . (Bolaños, 2005)

1.4.4. Fotónicos

Piqué (2010) indica que los procesos fotónicos mediante la luz solar generan reacciones para producir la hidrólisis del agua. Esta se divide en dos procesos: los fotobiológicos y fotoelectroquímicos. Este proceso demuestra una eficiencia de 30% mayor que la electrolisis realizada por células fotovoltaicas.

El proceso fotobiológico consiste en la producción de hidrógeno a partir de organismos como las algas verdes, cianobacterias, bacterias fotosintéticas y bacterias de fermentación oscura, estos intervienen como catalizadores biológicos y junto con el agua y enzimas se puede obtener hidrógeno.

1.4.5. Electrólisis

La electrólisis es un proceso que consiste en pasar una corriente eléctrica a través del agua lo cual produce la disociación de las moléculas de hidrógeno y oxígeno, como se muestra en la reacción (1); los electrodos (ánodo y cátodo) son los encargados de provocar el desplazamiento de los electrones colocados en una solución, el hidrógeno se recoge en el cátodo y el oxígeno en el ánodo.

La electrólisis obtiene hidrógeno puro más efectivo, pero en cantidades bajas. Otras ventajas de este método es la producción de hidrógeno libre de emisiones y que se puede implementar fuentes de energía externas renovables como energía solar o eólica.



Debido a que el agua pura no cuenta con las propiedades adecuadas para ser un conductor para la corriente, se ve en la necesidad de agregar soluciones ya sean sales o ácidos, esto con la finalidad de permitir la descomposición de iones positivos y negativos. Algunos de las soluciones son:

- *KCl*: Cloruro de Potasio.
- *HCl*: Ácido clorhídrico.
- *NaOH*: Hidróxido de Sodio.
- *CuSO₄*: Sulfato de cobre.
- *H₂SO₄*: Ácido sulfúrico.
- *CH₃ – COOH*: Ácido acético.
- *KOH*: Hidróxido de Potasio.
- *NaCl*: cloruro de sodio o sal de mesa.

El uso de electricidad en el proceso tiene como ventaja la posibilidad de utilizar toda fuente primaria de energía para la producción de hidrógeno. No obstante, el principal inconveniente que presenta este proceso consiste en que, como la molécula del agua es muy estable, la energía que hay que poner en juego para lograr disociar también es grande: 286,45 kJ/mol a 25 °C (Morante et al., 2020). Sin embargo cabe recalcar que el hidrógeno producido es de gran pureza.

Considerando que poder calorífico inferior del hidrógeno es de 241,82 kJ/mol, se consumen 237,75 kJ eléctricos por cada 241,82 kJ contenidos en el hidrógeno, es decir, se producen 1,02 kJ de hidrógeno por cada kJ consumido. Por otra parte, si la reacción ocurre con vapor de agua a 1.000°C se producen 1,36 kJ de hidrógeno por cada kJ consumido. (Hurtado et al., 2007) (Morante et al., 2020)

Según lo anterior, al trabajar con una electrolisis a altas temperaturas, el consumo electrónico sería alto, no obstante, el nivel de consumo eléctrico correspondería a los valores aceptables. Para este proceso se debe considerar 2 factores:

- La fuente térmica debe hallarse a elevadas temperaturas y precisar de vapor de agua.
- Los electrolizadores deben ser de óxidos sólidos.

Por otro lado, García-Conde (2010) expresa que la electrolisis a bajas temperaturas tiene un consumo energético muy elevado, ya que toda la energía requerida para la separación de la molécula deberá realizarse en forma de electricidad, por lo tanto se justifica si se busca generar hidrógeno in situ y en un bajo nivel de producción (pila de combustible), esto se detalla más en la

Tabla 4

Eficiencia energética de la electrolisis

		Valores teóricos			
P de [Bar]	T [C]	Electricidad necesaria [GJ/GJ H ₂]	Calor necesario [GJ/GJ H ₂]	Energía total necesaria [GJ/GJ H ₂]	Eficiencia global [%]
1	25	0,98	0,20	1,18	84,6
1	1000	0,74	0,63	1,37	73,1
400	25	1,07	0,20	1,27	78,6

Nota. Fuente: Bases Esenciales para el Establecimiento de Políticas

Otro factor para considerar en la producción de hidrógeno por electrolisis es la presión. En base a la Tabla 4, las presiones se recomiendan que sean altas, puede parecer inadecuado ya que la energía eléctrica solicitada en el proceso aumentaría, sin embargo, al trabajar con presiones altas en el suministro del electrolizador se impide el costo adicional de compresión del hidrógeno al necesitar almacenarlo.

En base a lo anterior, trabajar con presiones altas y temperaturas bajas representa una mayor eficiencia que el caso inverso, este aspecto resulta importante al momento del diseño de sistemas de provisión de hidrógeno mayormente enfocado a los costos de compresión para su almacenamiento.

1.5. Almacenamiento del hidrógeno en función de su estado

El hidrógeno debido a sus propiedades físicas es uno de los elementos que al hablar sobre su almacenamiento supone todo un reto; y es que, el hidrógeno es un material con la capacidad de almacenar mucha energía por unidad de masa, pero muy poca por unidad de volumen, véase la Figura 2, en consecuencia, un kilo de hidrógeno ocupa una gran cantidad de volumen lo que conlleva dificultades para su comercialización y desarrollo económico del hidrógeno (Aguado,

Casteleiro-Roca, Jove, Zayas-Gato, Quintián, y Calvo-Rolle, 2021). Este factor a dado motivo para la investigación de hallar métodos o formas para incrementar la densidad volumétrica.

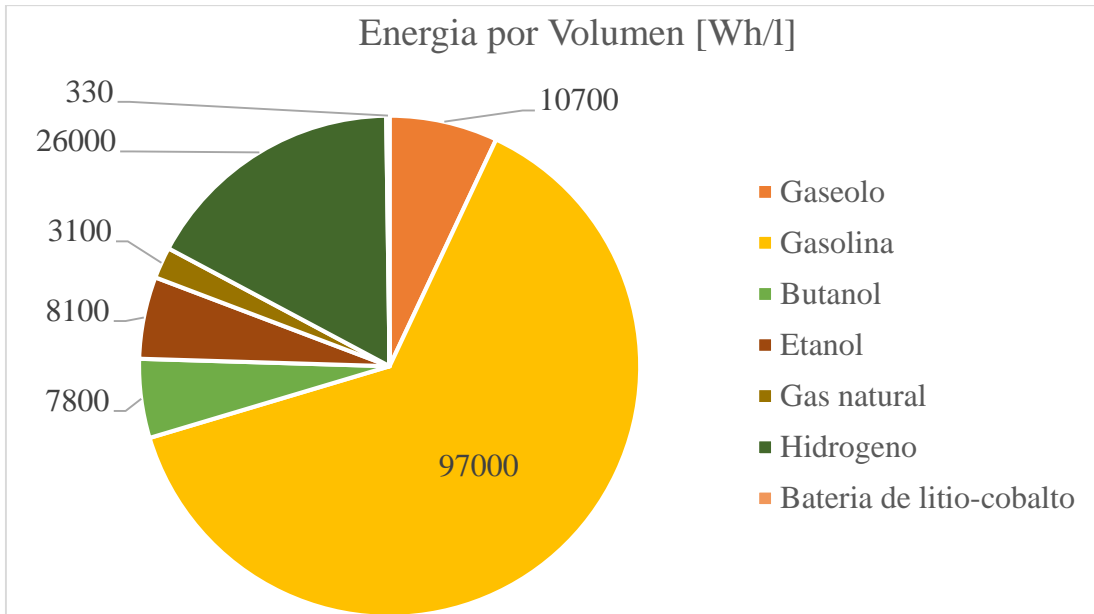


Figura 2. Densidad energética por unidad de volumen

Fuente. Autores

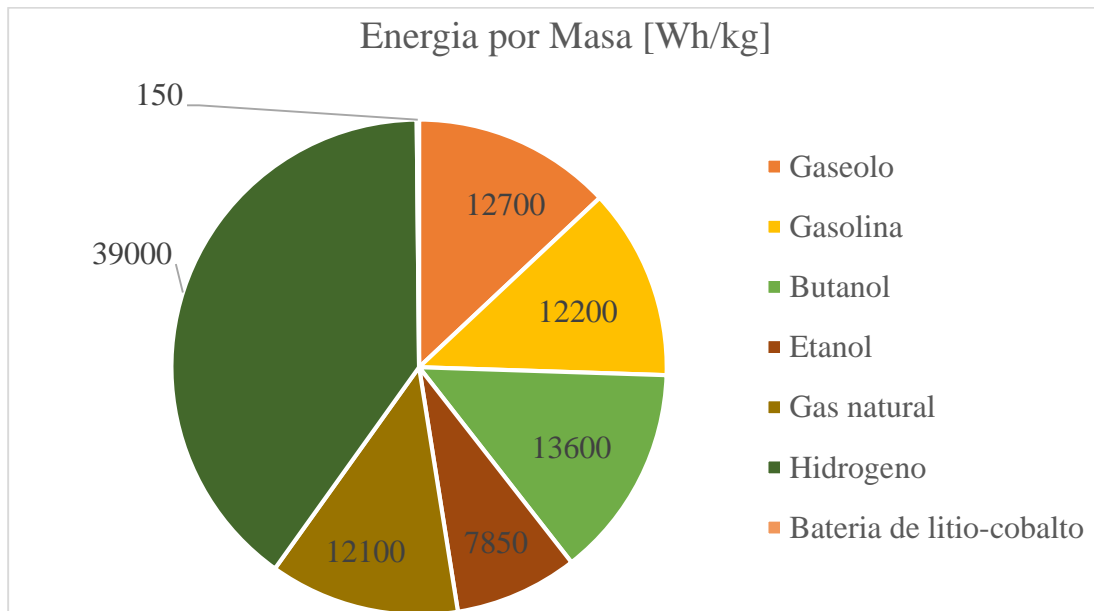


Figura 3. Densidad energética por unidad de peso

Fuente. Autores

En la actualidad existen ya métodos de almacenamiento, para la selección dependerá según la técnica más adecuada para la aplicación que se le dé al hidrógeno y el nivel de energía que se requiera. Cada uno de los métodos cuenta con sus ventajas y desventajas, sin embargo, ninguno hasta la fecha es superior a los otros. Dentro de la industria de producción de hidrógeno se han planteado una división principal para las alternativas de almacenamiento considerando una mayor masa en menor volumen:

- Hidrógeno comprimido.
- Hidrógeno en estado líquido.
- Hidrógeno sólido.

1.5.1. Almacenamiento de hidrógeno líquido

Para el almacenamiento del hidrógeno en estado líquido se debe considerar que la temperatura a la que el hidrógeno existe como líquido y a presión ambiente es de 253°C bajo cero. Para el acopio del hidrógeno líquido, el armazón de los depósitos de almacenamiento deben ser cuerpo de acero inoxidable o de una aleación de aluminio altamente resistente a la corrosión con más de 2 mm de espesor. Como aislamiento térmico, se utiliza una cámara provista de capas de aluminio o polímero de aluminio separadas por fibra de vidrio en su interior, a la que se realiza el vacío a una presión inferior a 0,01 Pa. (Sastresa y Bribián, 2011)

1.5.2. Almacenamiento de hidrógeno comprimido

Este es método más usado, sencillo y sobre todo el más estudiado dentro de la industria. El hidrógeno como ya se sabe se lo halla en estado gaseoso a temperatura ambiente a lo cual como ya se mencionó debido a su baja densidad energética por unidad de volumen requiere que sea almacenado a grandes presiones (entre 200-700 bar), para obtener la mayor cantidad de masa. Para comprimir 1 kg de hidrógeno desde presión atmosférica hasta 200 y 700 bar con un compresor

multietapa se requiere 10 y 17 MJ que equivalen a aproximadamente un 8 y 14 % del poder calorífico inferior del hidrógeno, respectivamente. (Asensio, 2007) (Sastresa et al., 2011)

Los tanques de almacenamiento se clasifican en base a su fabricación y máximo valor de presión que soportan, revisar la .

Tabla 5

Clasificación de diferentes tipos de almacenamiento de hidrógeno

Tipo de tanque	Descripción	Presión soportada (Bar)	Características
Tipo I	Deposito cilíndrico de Acero o Aluminio	150-300	Depósitos de paredes gruesas y pesadas. Usada en aplicaciones estacionarias industriales
Tipo II	Deposito Metálico inoxidable sin costuras parcialmente embobinado con fibra de vidrio o de carbono	450 - 800	Depósitos muy pesados, usados especialmente como tanque intermedio en aplicaciones estacionarias
Tipo III	Deposito revestido de aluminio sin costuras y envueltos totalmente con fibra de carbono.	350 - 700	Depósitos ligeros y de paredes delgadas. Se usa principalmente para el transporte del hidrógeno
Tipo IV	Depósitos con revestimiento de polímero, envueltos con fibra de carbono.	350 - 700	

1.5.3. Almacenamiento de hidrógeno sólido

El almacenamiento de hidrógeno sólido refiere a los sistemas de almacenamiento formados de parte de la composición molecular de un compuesto sólido mediante reacción y/o adsorción, esta tecnología dentro de la industria es considerada de las más seguras y eficiente tanto para aplicaciones de transporte como estacionarias. Dentro de este grupo se halla los métodos por:

- Hidruros metálicos.
- Nanoestructuras de carbono.

1.6. Seguridad y Normalización

En 1990 fue creado un comité por parte de la organización ISO (International Organization for Standardization), llamado "TC 197 Hydrogen technologies", con la finalidad de elaborar normas que regulen los diversos sistemas y dispositivos de producción, almacenamiento, transporte y formas de uso del hidrógeno dentro de las industrias. Estas normas se nombran en la

Tabla 6

Normativas referentes al manejo del hidrógeno

Norma	País	Tipo
US Department of Labor, OSHA: 29 CFR 1910.103 Hydrogen	Estados Unidos	Seguridad
AIAA G-095 Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems	Estados Unidos	Seguridad

ISO TR 15916 Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems	Internacional	Seguridad
GB 4962-2008 Technical safety regulation for gaseous hydrogen use	China	Seguridad
KS B ISO 15916 Basic consideration for the safety of hydrogen systems	Corea	Seguridad
ISO 14687-2 Hydrogen Fuel - Product Specification, Part 2: PEM fuel cell applications for road vehicles	Internacional	Especificaciones del combustible
GB/T 7445-1995 Pure hydrogen, high purity hydrogen and ultra-pure hydrogen	China	Especificaciones del combustible
ASTM D7634-10 Microscopic Measurement of Particulates in Hydrogen Fuel	Estados Unidos	Test de contaminantes
ASTM D7634-10 Microscopic Measurement of Particulates in Hydrogen Fuel	Unión Europea	Test de contaminantes
ISO TC197 Working Group 9 (ISO 16110-2) Hydrogen Generators Using Fuel Processing Technologies Part 2: Test Method for Performance	Internacional	Performance de generadores
US Department of Labor, OSHA: 29 CFR 1910.103 Hydrogen	Estados Unidos	Instalación de generadores
NFPA 55 Storage, Use and Handling of Compressed Gases and Cryogenic Fluids in Portable and	Estados Unidos	Almacenamiento y transporte

Stationary Containers, Cylinders and Tanks: Chapter 10

Gaseous Hydrogen Systems

IEC 60079-29-2 Explosive atmospheres – Part 29-2:

Gas detectors - Selection, installation, use and
maintenance of detectors for flammable gases and
oxygen

Internacional

Detectores de
hidrógeno

Nota. Fuente: Generación de Energía a partir de Hidrógeno

Organizaciones como la National Fire Protection Association (NFPA), ISO y International Electrotechnical Committee (IEC), establecen normalizaciones, reglas o leyes que buscan estandarizar la producción, transporte y almacenamiento del hidrógeno con el objetivo de proteger a los usuarios y a las industrias.

1.7.Celdas de combustible

Una celda de combustible es un elemento electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica, esto sin la necesidad de una combustión, por consiguiente, reduciendo las pérdidas energéticas derivadas de la termodinámica, convirtiéndolos en dispositivos altamente eficientes. Básicamente, las celdas de combustible cuentan con un ánodo, en el cual el combustible es oxidado, un cátodo en donde el oxígeno es reducido y el electrolito. Por ejemplo, puede generar electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión (celdas de hidrógeno). (Ruiz, 2010)

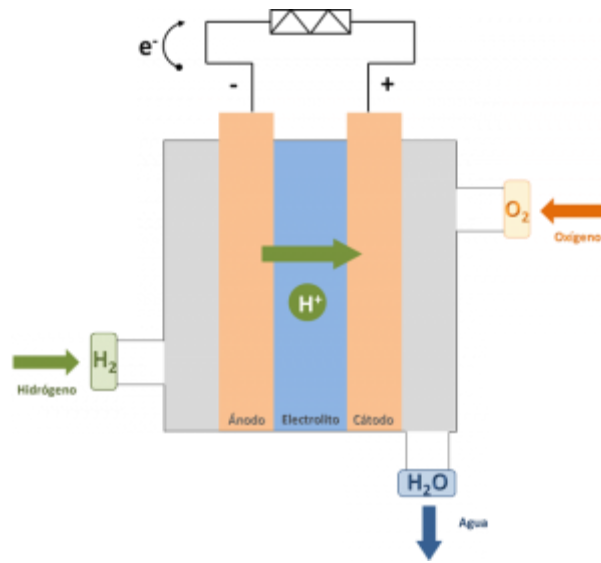


Figura 4. Celda de combustible

Fuente. Centro Nacional de Hidrógeno. (2019). Pilas de combustible

La implementación de este tipo de celdas de combustible representa una solución a largo plazo, ya que el uso de los diversos hidrocarburos obtenidos en la reacción química es utilizado en la combustión logrando reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Actualmente las celdas de combustible se pueden considerar un nexo entre las tecnologías actuales (motores de combustión interna) y las nuevas a desarrollarse (tecnologías de cero emisión), debido que para su funcionamiento necesitan de una fuente de energía para su funcionamiento, principalmente utilizado de la misma combustión de las fuentes fósiles.

Una de las principales celdas de combustible que son utilizadas son las celdas de hidrógeno, debido a que esta es la más óptima en la generación de energía limpia, gracias a que su proceso de obtención de hidrógeno es sencillo. Este proceso consiste en la electrolisis del agua, la cual consiste en circular corriente eléctrica por las placas de la celda, así separando el hidrógeno y el oxígeno del agua.

1.8. Tipos de celdas de combustibles

En la actualidad existe una gran variedad de tipos de celdas de combustible y su clasificación va a depender del tipo de electrolito que se utilice en la misma. Determinar este parámetro es de gran importancia, ya que de esto va a depender totalmente la reacción que se produzca en la celda, la temperatura de operación, el tipo de catalizador y la fuente de combustible requerido. Entre los tipos de celdas de combustible se hallan:

- Celdas de ácido fosfórico (PAFC).
- Celda de carbonato fundido (MCFC).
- Celdas de polímero sólido (PEM).
- Celdas alcalinas (AFC).
- Celda de oxido sólido (SOFC).

1.8.1. Celdas de ácido fosfórico (PAFC)

Las celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) utilizan ácido fosfórico como su electrolito y por otro lado sus electrodos están constituidos por carbono poroso, en donde su interior tiene como catalizador al elemento platino. La temperatura de operación de esta celda es de 180 °C y cuenta con una eficacia del 80% cuando es utilizado como generador de energía eléctrica y térmica (Cruz y Jiménez, 2010). Entre sus características están, revisar .

Tabla 7

Ventajas y desventajas de la celda de ácido fosfórico (PAFC)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • La contaminación del <i>CO</i> no tiene gran influencia en este tipo de celda 	<ul style="list-style-type: none"> • Son menos eficaces cuando solo se utiliza para generar energía

eléctrica, llegando a obtenerse entre 36% y 42%

- Obtiene una eficiencia del 80% cuando es utilizado como generador de energía calorífica y térmica
- Su aplicación principal, debidos a sus características, es en generación estacionaria
- Presentan un coste más elevado para su fabricación
- Producen menos energía en comparación con otros tipos de celdas de igual tamaño y volumen

Nota.

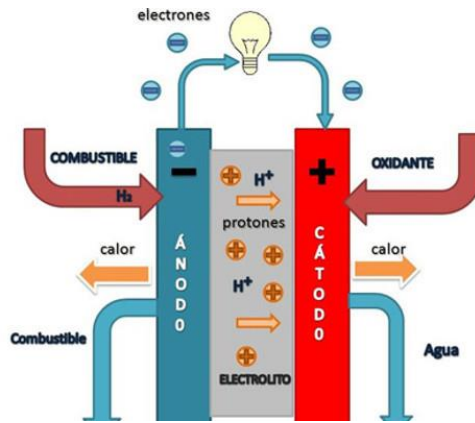


Figura 5. Esquema de una celda de ácido fosfórico (PAFC)

Fuente. Chero, P. (2014). El H_2 y la pila de combustible

1.8.2. Celda de carbonato fundido (MCFC)

Las celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC) utilizan como electrolito una mezcla de carbonatos, tales como, litio, sodio o potasio y como catalizador oxido de litio-aluminio. Estas celdas de combustible tienen un rango de temperatura de funcionamiento muy elevado, los cuales

van desde los 600 °C hasta los 1000°C. Por otro lado su rendimiento se encuentra en un 60% (Cruz y Jiménez, 2010). Otras cualidades que presenta son, ver .

Tabla 8

Ventajas y desventajas de la celda de carbonato fundido (MCFC)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tiene una eficiencia alta: 50% al 60% cuando solo es utilizado como generador de energía eléctrica y 85% cuando se capta energía eléctrica y térmica • Esta celda es apta para utilizar combustibles a base de carbón • Gracias a las altas temperaturas de funcionamiento, los combustibles presentan un proceso de conversión interna obteniendo hidrógeno 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca vida útil de la celda debido a la corrosión por parte del electrolito y a las altas temperaturas de operación

Nota.

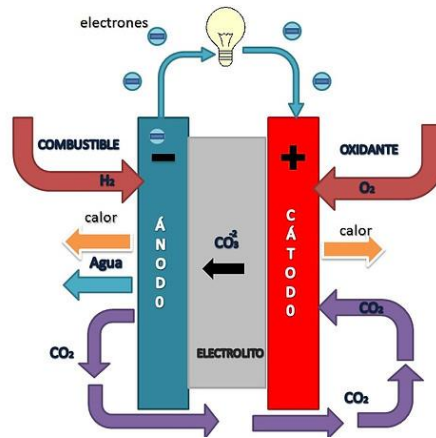


Figura 6. Esquema de una celda de carbonato fundido (MCFC)

Fuente. Chero, P. (2014). El H_2 y la pila de combustible

1.8.3. Celdas de polímero sólido (PEM)

Las celdas de polímero sólido (PEM) usan polímero sólido como electrolito y sus electrodos internamente tienen platino como catalizador, por lo cual este sistema tiene un costo elevado. Este tipo de celda funcionan en un rango de temperatura entre los 50 °C y 100 °C. Por lo general usan hidrógeno como combustible, por lo que solo es necesario agua, oxígeno e hidrógeno, a diferencia de otros tipos de celdas que utilizan fluidos corrosivos (Cruz y Jiménez, 2010). Ver .

Tabla 9

Ventajas y desventajas de la celda de polímero sólido (PEM)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Su constitución lo hace ser pequeñas y ligeras 	<ul style="list-style-type: none"> Es muy sensible a la contaminación por CO

- Proporciona una elevada densidad energética
- El almacenamiento del hidrógeno se lo realiza en depósitos presurizados y la baja densidad energética del hidrógeno no permite la gran autonomía en vehículos que realicen gran recorrido
- Su vida útil es alta
- Su aplicación principal es en medio de transporte de pasajeros

Nota.

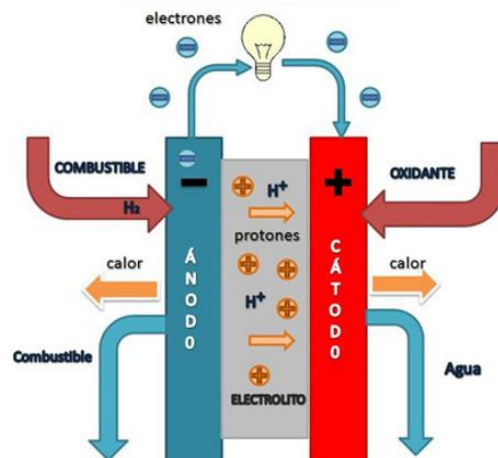


Figura 7. Esquema de una celda de polímero sólido (PEM)

Fuente. Chero, P. (2014). El H_2 y la pila de combustible

1.8.4. Celdas alcalinas (AFC)

Las celdas alcalinas (AFC) fueron las primeras celdas de combustible en fabricarse y esencialmente se aplicó en programas aeroespaciales estadounidenses para la producción de

energía eléctrica y agua. Estas celdas utilizan como electrolito una solución de hidróxido de potasio y como catalizadores se utilizaron metales no preciosos. El rango de temperatura de operación se comprende entre los 100 °C y los 250 °C (Cruz y Jiménez, 2010). Entre sus principales características se hallan, ver .

Tabla 10

Ventajas y desventajas de la celda alcalina (AFC)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Tienen una eficiencia alta, contando con un 60% Son de alto rendimiento gracias a la velocidad de las reacciones que se dan en la celda 	<ul style="list-style-type: none"> Extremadamente susceptible a la contaminación por parte del CO₂ Vida útil baja debido al punto anterior

Nota.

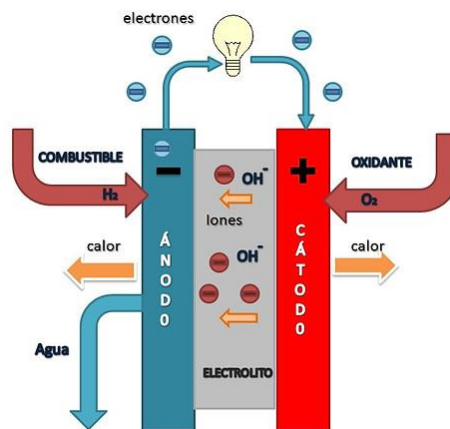


Figura 8. Esquema de una celda alcalina (AFC)

Fuente. Chero, P. (2014). El H₂ y la pila de combustible

1.8.5. Celda de oxido sólido (SOFC)

Las celdas de oxido solido (SOFC) utiliza como electrolito un sólido cerámico y óxidos. Estas celdas tienen un rango de temperatura de operación elevado que van desde los 800 °C hasta los 1000 °C, y tienen una eficiencia del 60% (Cruz y Jiménez, 2010). Otras ventajas y desventajas características de esta celda son, ver .

Tabla 11

Ventajas y desventajas de la celda de oxido sólido (SOFC)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• No presenta contaminación cuando está en contacto con el CO	<ul style="list-style-type: none">• La puesta en marcha es demasiada lenta, debido a que se tiene que alcanzar altas temperaturas de funcionamiento
<ul style="list-style-type: none">• Apta para la utilización de combustibles a base de carbón	<ul style="list-style-type: none">• Las altas temperaturas de funcionamiento reducen la vida útil de la celda
<ul style="list-style-type: none">• Tiene un bajo coste de fabricación	

Nota.

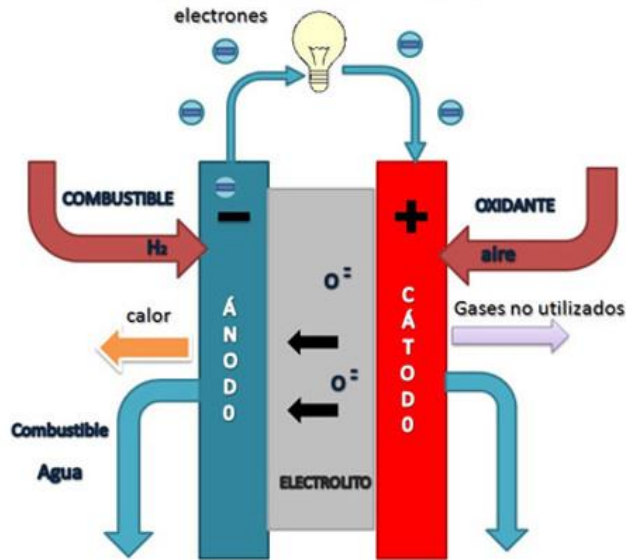


Figura 9. Esquema de una celda de oxido sólido (SOFC)

Fuente. Chero, P. (2014). El H₂ y la pila de combustible

1.8.6. Tabla resumen de los tipos de celdas de combustibles

Las principales diferencias entre las celdas de combustible se pueden observar en la

Tabla 12

Características de las diferentes celdas de combustibles

Tipo de celda	Electrolito	Temperatura de operación	Eficiencia	Potencia
Celdas de ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico	180 °C	80%	50 kW - 11 MW

Celda de carbonato fundido (MCFC)	Carbonatos (litio, sodio o potasio)	600 °C hasta 1000 °C	60%	100 kW - 2 MW
Celdas de polímero sólido (PEM)	Polímero solido	50 °C hasta 100 °C	60%	5 kW - 250 kW
Celdas alcalinas (AFC)	Hidróxido de potasio	100 °C hasta 250 °C	60%	5 kW - 150 kW
Celda de oxido sólido (SOFC)	Solido cerámico y óxidos	800 °C hasta 1000 °C	60%	100 kW - 250 kW

Nota.

1.9.Celdas de hidrógeno

La celda de hidrógeno es un dispositivo que transforma el agua (H_2O) a través del principio de la electrolisis en sus componentes químicos, en donde, dos electrodos son sumergidos en agua y por ellos circula electricidad, así obteniendo en el electrodo positivo y negativo, oxígeno y gas de hidrógeno, respectivamente.

A diferencia de las máquinas de combustión cuya eficiencia está regida por el ciclo de Carnot y limitada por la temperatura, la eficiencia teórica de las celdas de hidrógeno está dada por las leyes de Faraday, que relacionan directamente la corriente producida en una reacción electroquímica con la cantidad de material reactivo, es decir, con la cantidad de combustible. La mayor ventaja de las celdas de combustible descansa realmente en el hecho de que no están limitadas por la temperatura, lo cual les otorga el gran beneficio de alcanzar altas eficiencias. (Ulises, 1999)

1.9.1. Tipos de celdas de hidrógeno

Existen principalmente dos clasificación para los tipos de celda de hidrógeno y esto se determina mediante al medio que este expuesta, estas pueden ser de:

- Celda de hidrógeno de tipo húmeda.
- Celda de hidrógeno de tipo seca.

1.9.1.1. Celdas húmedas de hidrógeno

Es un tipo de celda que consta de electrolito líquido que fluye con facilidad, por lo que en sus terminales de la batería están conectados con la carga provocando una reacción química entre el electrolito , el plomo y el óxido de plomo. Esta reacción química provoca el flujo de electricidad a la carga a través de terminales que además conducen a la eliminación del ácido sulfúrico de la solución que se refuerza a las placas. (Pesantez y Tacuri, 2020)

Las celdas de hidrógeno de tipo húmeda tienen una composición principal por placas de acero inoxidable, espiral de alambre, etc., que al estar bañados por el electrolito, producen el hidrógeno a través de burbujas las cuales se extraen por la parte superior de la celda.

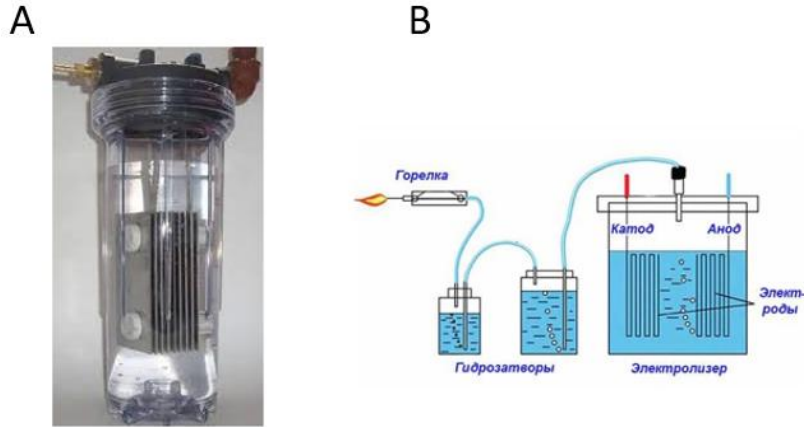


Figura 10. A) Celda de hidrógeno de tipo húmeda, B) Esquema del funcionamiento de una celda de hidrógeno de tipo húmeda

Fuente. Autores

1.9.1.2. Celdas de hidrógeno tipo seca

La celda de hidrógeno de tipo seca lleva su nombre, ya que a diferencia de la celda de tipo húmeda, esta no va sumergida en el electrolito para el proceso de producción, sino que el electrolito circula a través de esta. Estas celdas presentan un diseño y prototipo más eficiente y fácil de usar que una celda sumergida o húmeda, la cual se caracteriza por que la misma celda es el propio contenedor. (Quezada y Torres, 2014)

Este tipo de celda tiene el mismo funcionamiento y principio de generación de hidrógeno que una celda de tipo húmeda, la cual es la electrolisis, circular corriente eléctrica a través de los electrodos, en la siguiente imagen se puede visualizar de mejor manera las disposiciones de cada tipo de celda.

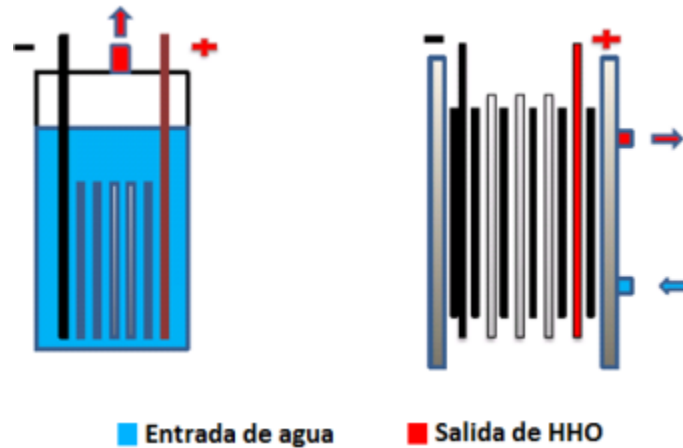


Figura 11. Disposiciones de las celdas de tipo húmeda (izquierda) y tipo seca (derecha)

Fuente. López, M. (2012). Armado de celda seca

Componentes

- Electrolito

Es una sustancia que tiene como función comportarse como medio de conducción de energía eléctrica, por lo tanto dentro de su composición contiene electrolitos libres, y gracias a ello también se los conocen por el nombre de soluciones iónicas.

- Depósito de electrolito

Cumple la función de contener el electrolito que será alimentado a la celda de hidrógeno de tipo seca. El depósito debe ser de un material que tenga las características de soportar grandes temperaturas, humedad, corrosión, debido a que las condiciones de trabajo presenten en el vehículo son de gran impacto.

- Burbujeador

El burbujeador consiste en un tanque en donde tiene la función de almacenar electrolito y en la parte interna también recibirá el hidrógeno en forma de gas proveniente de la celda y las misma transporta a la admisión del motor por medio de mangueras.

- Mangueras

Son mangueras fabricadas de Policloruro de vinilo y son capaces de transportar diversos fluidos por dentro de su cavidad. Su principal característica es la resistencia a la variación de temperatura, por lo cual le proporciona una larga vida útil.

- Circuito eléctrico

Las conexiones eléctricas para el circuito de alimentación de la celda de hidrógeno de tipo seca consisten en: Cables, tienen la capacidad de conducir la electricidad y son fabricados en cobre. Conectores, son de gran ayuda para conectar los cables entre sí, y son utilizados de gran manera en el área automotriz.

Funcionamiento.

La celda de hidrógeno de tipo seca necesita de dos elementos principales para su funcionamiento: una corriente eléctrica continua de 12 V, la cual es obtenida a través de una batería, y el segundo elemento es agua destilada con una solución salina; y a través de la reacción por parte de la electrolisis, la celda nos proporciona oxígeno e hidrógeno, el cual este último será dirigido directamente a la admisión de aire del motor, por ende se obtendrá una mezcla estequiométrica y sedará el proceso de combustión en los cilindros del motor.

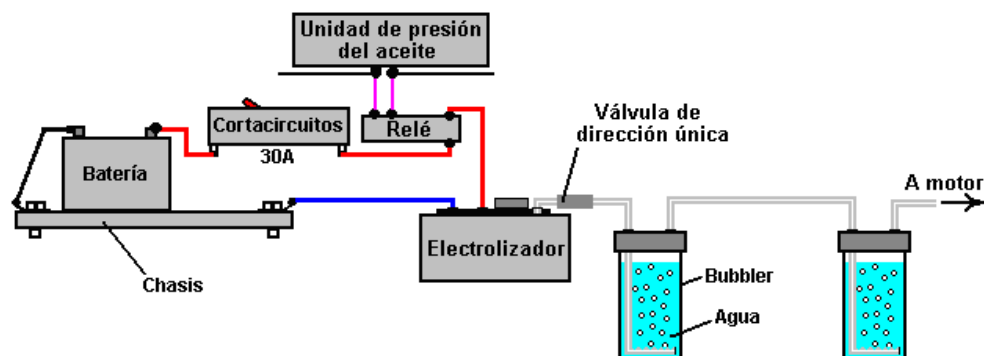


Figura 12. Esquema de funcionamiento la celda de hidrógeno de tipo seca

Fuente. Rey, H. (2014). HHO México, Hidrógeno Automotriz.

1.10. Antecedentes investigativos

La contaminación ambiental es uno de los mayores retos que enfrenta el mundo. Dentro de los principales fuentes de contaminación se halla el sector automotriz, debido a la gran demanda de vehículos con motores de encendido provocado, esto ha llevado a que la industria estudie el desarrollo de vehículos eléctricos, sin embargo, debido a la dificultad con la cual avanzan los estudios, se han buscado maneras de controlar las emisiones a través de medidas de medio plazo.

El uso del hidrógeno como combustible es una opción cuya emisión de gases contaminantes es nula, sin embargo, el uso de hidrógeno puro puede representar dificultades al momento de almacenarlo dentro de un vehículo. La medida más adecuada y estudiada es el uso de celdas de producción de hidrógeno capaces de generar el porcentaje adecuado para agregarlo a la mezcla aire-combustible. (Jodra 2005)

Se ha descubierto que el hidrógeno posee muchas propiedades de combustión únicas, y al usarlo como una adición en la mezcla puede llegar a mejorar la combustión y las características de rendimiento de los motores. Para ello, la gasolina se implementará como combustible principal y el hidrógeno como combustible secundario, que serán inducidos en el colector de admisión. Como resultado se ha visto que al adicionar hidrógeno en la combustión, las emisiones de HC y CO_2 se reducen con el aumento del nivel de mezcla de hidrógeno. La emisión de CO presenta un comportamiento según la cantidad de aire ingresado, aumenta cuando la proporción de aire es aproximadamente estequiométrica y disminuye en condiciones pobres. Las emisiones de NOx aumentan debido al incremento de temperatura en los cilindros. (Ji y Wang, 2009a)

Por otro lado, Ji y Wang (2009b) concretaron un estudio experimental en un motor de cuatro cilindros y 1.6 L con la finalidad de identificar las alteraciones mediante la adición de hidrógeno y las mejoras del rendimiento del motor en condiciones pobres. Los resultados fueron:

1. Cuando la proporción de exceso de aire está en condiciones estequiométricas, la presión media efectiva al freno (B_{mep}) disminuye con el aumento de la fracción de adición de hidrógeno. Pero cuando el motor funciona en condiciones pobres, la adición de hidrógeno ayuda a mejorar la B_{mep} .
2. La eficiencia térmica del freno motor y la relación de exceso de aire relevante para la máxima eficiencia térmica del freno aumentan con la adición de hidrógeno. La eficiencia térmica máxima del freno aumenta del 26,37 % para el motor de gasolina original al 31,56 % para el motor de gasolina enriquecido con hidrógeno con una fracción de adición de hidrógeno del 6 %.
3. La temperatura y presión máxima del cilindro aumentan, mientras que el desarrollo de la llama y la duración de la propagación se reducen con el aumento de la adición de hidrógeno. La variación cíclica también se alivia de manera efectiva mediante la adición de hidrógeno, especialmente en condiciones pobres.
4. Las emisiones de HC y CO_2 obviamente se reducen con el aumento del nivel de mezcla de hidrógeno. La emisión de CO aumenta con la adición de hidrógeno cuando la proporción de exceso de aire es aproximadamente estequiométrica, pero disminuye con la adición de hidrógeno en condiciones pobres. Debido al aumento de la temperatura del cilindro, las emisiones de NO_x aumentan obviamente con el aumento de la fracción de hidrógeno con las mismas relaciones de exceso de aire.

En otro estudio, Duque Cabrera et al. (2013), demuestran que, al añadir el gas hidrógeno a la combustión, esta se realizó de una forma más eficiente dando como resultado una mejora en las emisiones contaminantes, como se expuso en el caso del vehículo *kia Sportage* en el que hubo una disminución de HC de 24ppm a 5ppm.

En el caso de un motor rotativo, Ji y Wang (2016) concluyeron que el enriquecimiento de la combustión con hidrógeno redujo el desarrollo de llamas y los períodos de propagación. Además, las emisiones de *HC* se redujeron en un 44,8 % cuando la fracción de volumen de hidrógeno en la entrada se elevó del 0 % al 5,2 % con respecto al combustible; las emisiones de *CO* y *CO*₂ también se redujeron después de la mezcla de hidrógeno.

Por otro lado, la investigación realizada por Rivera (2015), en donde se muestra de manera esencial la obtención de hidrógeno a partir de aguas residuales producidas por la empresa Muebles León a través de una celda de electrolítica seca, se llegó a obtener que la producción de hidrógeno con aguas residuales es necesario un consumo de energía mayor con respecto a que si el electrolito fuera una mezcla de agua y bicarbonato de sodio, pero obteniendo mejores resultados, en comparación de una con la otra se obtiene una diferencia de 11000 ppm.

Capítulo II. DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO DE UNA CELDA DE TIPO SECA MEDIANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS

2.1. Introducción

En este apartado se plantea el proceso y la metodología a usar para llevar a cabo el proyecto. Se plantea la construcción de una estructura que soporte todo el sistema de producción de hidrógeno, y así mismo el diseño de un software capaz de permitir la visualización de la cantidad de gas hidrógeno producido por medio de un sensor. Además, se establecen los factores de estudio y las medidas adecuadas.

2.2. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos de la investigación el trabajo se presenta en dos partes, en la primera parte se presenta la metodología experimental mediante actividades técnicas que abrirán paso a la obtención de datos referentes a la producción de hidrógeno de una celda de tipo seca.

La segunda parte se presenta con la metodología analítica, en la cual, los datos obtenidos del desarrollo experimental se podrán analizar con el fin de determinar las mejores condiciones de trabajo de la celda de hidrógeno.

2.2.1. Recolección de información

Este trabajo de investigación dependerá de tres técnicas:

1. Revisión teórica, será la base para la recolección de información, para ello se revisó libros, tesis e investigaciones científicas de internet, siempre y cuando sean verificados y consten en bibliotecas virtuales o en páginas de investigación científica.
2. Observación, mediante un estudio de campo de tipo visual, se analizó el funcionamiento y la producción de hidrógeno.

3. Experimentación, mediante intervención se realizó variaciones de las variables que actúan para la producción de hidrógeno, para ello se ejecutaron las respectivas pruebas para validar los datos resultantes y plantear las combinaciones que demuestren una mayor eficiencia de producción sin tener un alto consumo de energía.
4. Los resultados pasan a un análisis por medio de un software matemático con la finalidad de obtener una valoración de los resultados y estimar la importancia de las variables medidas.

2.2.2. Desarrollo del proyecto

El proyecto se desarrolla de la siguiente manera

- Diseño de maqueta para la celda seca electrolítica.
- Diseño del programa / software de medición de hidrógeno.
- Planteamiento de valores y factores a interés de estudio.
- Recopilación de datos reales de las emisiones por medio de una corrida experimental.
- Valoración de los datos y estimación de importancia de las variables medidas.
- Análisis de los resultados.
- Desarrollo del informe final.

2.3. Diseño de soporte para la celda

Los elementos que componen al generador de hidrógeno tienen la necesidad de poseer una estructura la cual cumpla la función de estabilidad y mantener en correcto orden. Para la fijación de dichos elementos que lo componen se procedió en la elaboración del soporte estructural teniendo como apoyo en el software Inventor 2019 para los diversos modelados. Esta estructura debe considerar lo siguiente:

- Contener a los depósitos a una altura que permita la circulación del electrolito.

- Contener el circuito del sensor y procesamiento de datos (Arduino).
- Ser de fácil despiece para revisión y mantenimiento.

Como punto de partida, se procede en el modelado en Inventor 2019 de los diversos elementos que componen al sistema de generación de hidrógeno, dentro de los cuales podemos encontrar al depósito del electrolito, el burbujeador y al generador de hidrógeno, esto con el fin de tener las dimensiones reales y para la facilitación en el proceso de la fabricación.

Una vez determinado las dimensiones de los elementos se procede al modelado de la estructura, para ello se tiene como base principal una mesa en donde las dimensiones principales son de 60 * 60 * 55 cm.

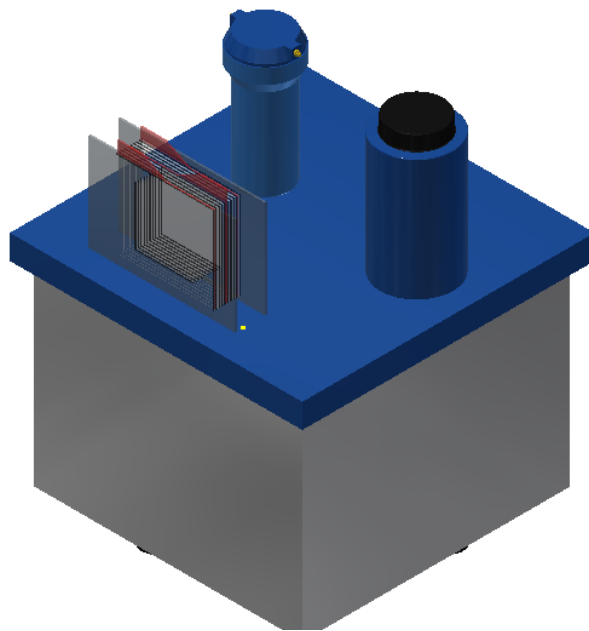


Figura 13. Modelado de los elementos del generador de hidrógeno

Fuente. Autores

La estructura que se presenta tiene una forma de grada esto debido a que el depósito del electrolito debe tener una altura superior con respecto a la celda para que fluya el electrolito de la mejor manera y se consiga llenar la misma, además que la estructura cuenta con dos plataformas en donde se alojaran los elementos electrónicos, tales como el Arduino y el sensor de hidrógeno.

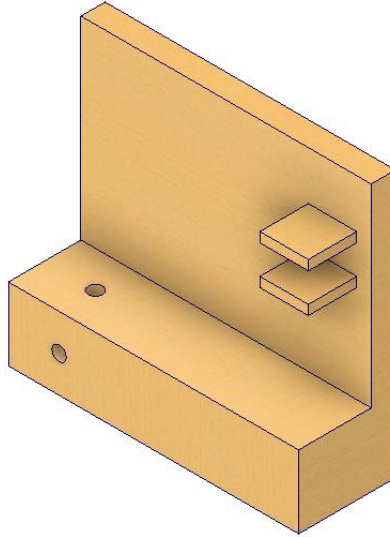


Figura 14. Estructura de los elementos del generador de energía

Fuente. Autores

El material optado para la elaboración de este es en madera MDF, debido a que es un material fácil de trabajar, además, otro punto importante para la elección de este es que este material es apto para el proceso de corte a laser, en donde fue el método optado para la obtención de las piezas debido a su gran grado de precisión.

Además de todo lo anterior mencionado, se ha presentado la necesidad de añadir un soporte lateral, la cual tiene la función de sobrellevar la computadora en donde se visualizarán los datos obtenidos de las mediciones de los sensores.

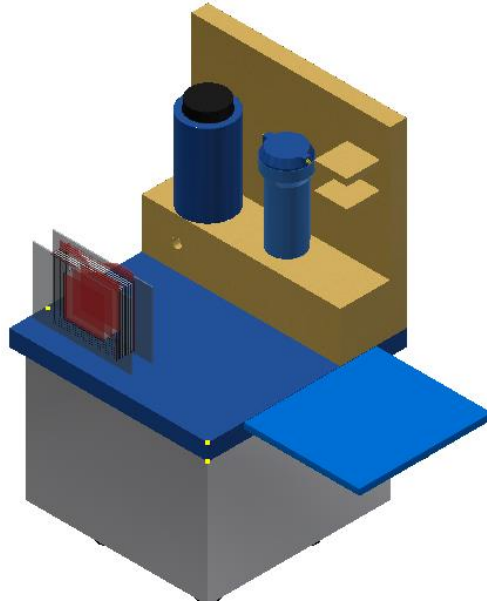


Figura 15. Ensamble final de los elementos del generador de hidrógeno

Fuente. Autores



Figura 16. Resultado final del ensamblado del soporte para la celda de hidrógeno.

Fuente. Autores

2.3.1. Composición de la celda de hidrógeno

La celda de tipo seca cuenta con dos sistemas, el primero hace referencia al generador o celda seca y el segundo es el circuito de gas. Cada uno de los elementos se detallan en la

Tabla 13

Parámetros de la celda de hidrógeno de tipo seca

Sistema	Elemento	Característica	Cantidad	
Generador	Laterales	Placas de acrílico	2	
		Espesor: 6mm		
	Electrodos positivos	Acero Inox 316L	1	
		Espesor: 3mm		
	Electrodos negativos	Acero Inox 316L	2	
		Espesor: 3mm		
	Electrodos neutros	Acero Inox 316L	6	
		Espesor: 3mm		
		Juntas		Goma EPDM
		Espesor: 3mm		
Circuito de gas	Elementos de sujeción : Pernos, tuercas y arandelas	Acero Inox	10	
	Burbujeador	Capacidad de 2L	1	
	Depósito de electrolito	Capacidad de 1L	1	
	Manguera	Transparentes	5m	

	Reforzadas	
	Racor instantáneo	
Racor en L	Forma L	3
	Para tubos de ½ in	
	Termo deformable	
	Racor instantáneo	
Racor en T	Forma T	1
	Para tubos de 12mm	
	Termo deformable	

Nota.

2.4. Diseño de software de medición de ppm de hidrógeno

El proyecto planea obtener una medición del nivel de generación de H_2 , para ello se ha analizado la opción de generar un software que en conjunto con sensores permitan determinar la producción de dicho gas. Para la elaboración de este software se consideró los siguientes factores:

1. Características del sensor.
2. Método de cuantificación del hidrógeno.
3. Captación y proceso de datos.
4. Visualización de los datos.

2.4.1. Selección de sensor

Teniendo en consideración las propiedades físicas del hidrógeno resulta complicado la medición y detección de este gas, lo cual representa una dificultad para la cuantificación del nivel de hidrógeno producido por la celda de hidrógeno tipo seca, sin embargo, actualmente la detección y cuantificación de hidrógeno se puede llevar a cabo por múltiples sistemas en base a sensores.

Entre las opciones presentes en el mercado existen:

- Sensor de gas MQ-2
- Sensor de gas MQ-8

Estos sensores cumplen con un carácter industrial con aplicaciones elevadas y pequeñas, además de ser de fácil acceso y ser sensores de bajo costo para diversas aplicaciones, se puede visualizar en la .

Tabla 14

Características de los sensores cuantificadores de hidrógeno

Sensor	Características	Detección de gas	Costo
Sensor de gas MQ-2	<ul style="list-style-type: none"> • Características de respuesta y recuperación rápidas • Voltaje de entrada: 5 [V] • Consumo de energía: 150 [mA] • Resistencia de censado: 1KΩ 50ppm Tolueno a 20KΩ in • Tiempo de Respuesta: ≤ 10s • Tiempo de recuperación: ≤ 30s • Temperatura de trabajo: -20 °C ~ +55 °C • Humedad: ≤ 95% RH • Contenido de oxígeno ambiental: 21% 	Concentración detectable :300 - 10000 ppm utilizado para medir LPG, propano, hidrógeno, metano y otros combustibles	\$ 2,00

Sensor de gas MQ-8	• Voltaje de alimentación: 5 VDC	Concentración detectable :100 ppm a 10000 ppm	
	• Consumo de potencia: 800 mW máximo		
	• El módulo cuenta con salida analógica y digital	Alta sensibilidad al Hidrógeno (H2)	\$ 4,00
	• Comparador analógico incluido en el módulo	Pequeño sensibilidad al	
	• Punto de disparo de la señal digital ajustable mediante potenciómetro	alcohol, GLP, humos de cocina	

Nota.

En base a la revisión de los manuales de ambos sensores, el sensor MQ – 8 es el seleccionado para la realización de la medición del hidrógeno, esto debido a que su fabricación va dirigida a la cuantificación de hidrógeno presente en el ambiente.

2.4.2. Cuantificación de la cantidad de hidrógeno obtenido

El sensor MQ – 8 detecta el nivel de hidrógeno y emite la señal de las resistencia, esta señal recibida no presenta de forma directa la cantidad de ppm de hidrógeno que hay en el ambiente, de modo que debe ser transformada. Para ello se decidió utilizar el método de lineación.

El termino lineación en matemáticas y sus aplicaciones, hace referencia a hallar una aproximación lineal a una función por medio de puntos. Los valores usados son extraídos de la gráfica característica de sensibilidad del sensor MQ – 8 de diferentes gases, Figura 17. En la gráfica sobresale la curva característica del hidrógeno en función a la relación R_s/R_o por ppm.

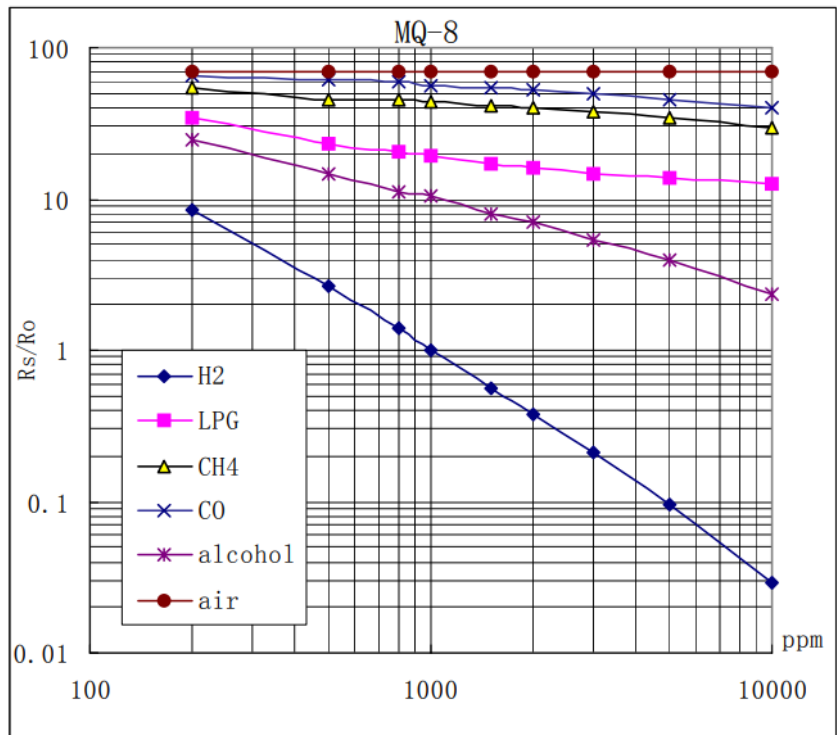


Figura 17. Curva de sensibilidad del sensor MQ-8.

Fuente. Hanwei electronics. (2014). TECHNICAL DATA MQ-8 GAS SENSOR Recuperado de:

https://www.mouser.com/datasheet/2/830/MQ_8-1951103.pdf

En base a la gráfica extraída del manual del sensor se puede detallar las siguientes relaciones, revisar .

Tabla 15

Relación entre la resistencia y las partículas de hidrógeno medidas

R_s/R_o	PPM (H2)
8.5	200
5	300
1.5	800

1	1000
0.095	5000
0.07	6000
0.02	10000

Nota.

Los datos adquiridos son introducidos al software Microsoft Excel, obteniendo la curva de tendencia como se muestra en la Figura 18, la cual a su vez presenta la ecuación (2)

$$y = 27640x^{-1,497} \quad (2)$$

Lo cual representa a

$$R_s/R_o = 27640(\text{ppm})^{-1,497} \quad (3)$$

Donde

$$R_s = 27640(R_o)(\text{ppm})^{-1,497}$$

A lo que según el anexo 2 define que

R_s : La resistencia de detección del sensor MQ – 8.

R_o : La resistencia del sensor a 1000 ppm de hidrógeno en aire limpio.

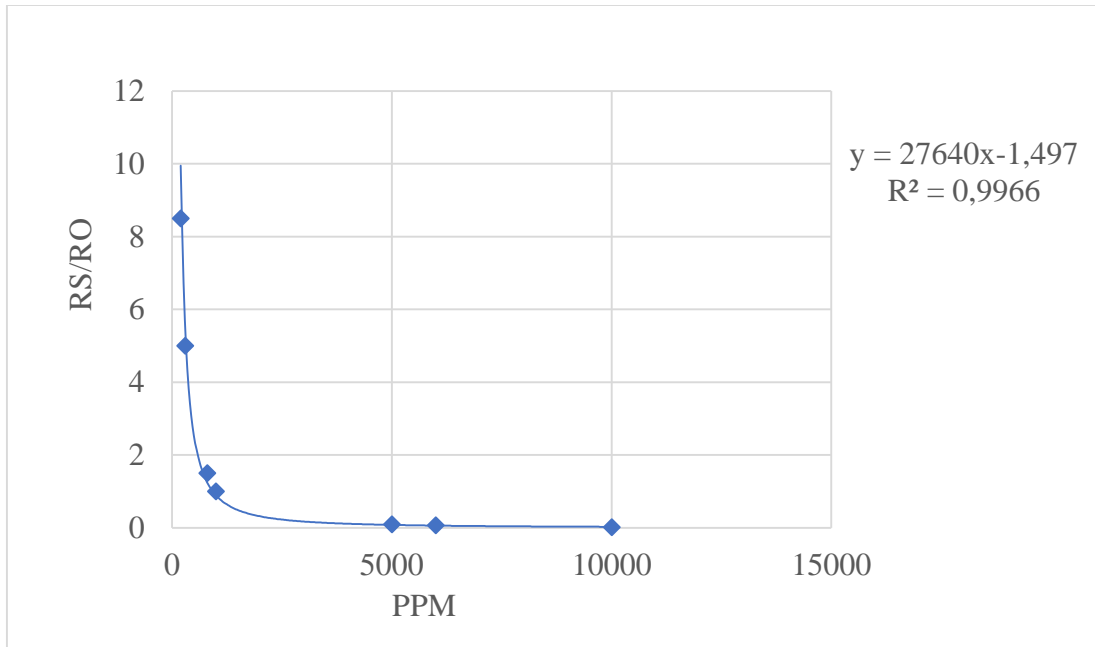


Figura 18. Curva de producción ppm de hidrógeno en función de Rs/Ro.

Fuente. Autores

Al revisar nuevamente el manual del sensor MQ – 8, se presenta que este proporciona un circuito divisor de voltaje, Figura 19, con dicho circuito se plantea el uso de la ecuación para calcular la resistencia Rs del sensor.

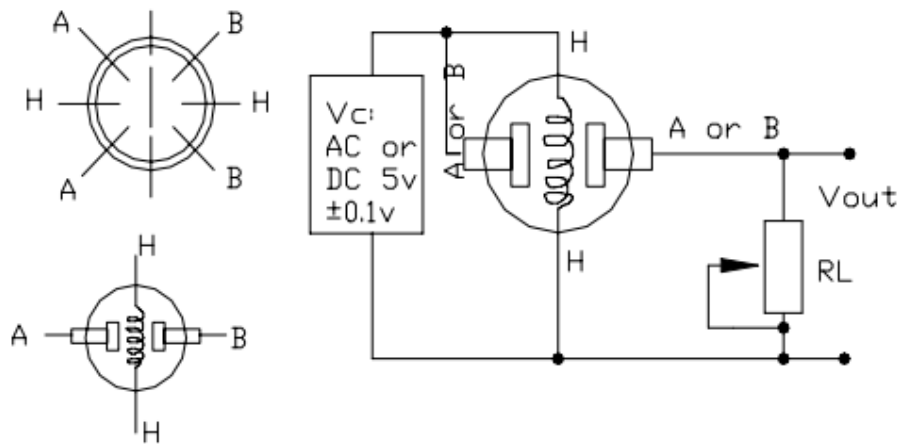


Figura 19. Estructura del circuito del sensor MQ-8.

Fuente. Hanwei electronics. (2014). TECHNICAL DATA MQ-8 GAS SENSOR Recuperado de:

https://www.mouser.com/datasheet/2/830/MQ_8-1951103.pdf

$$V_{out} = \frac{R_l}{R_s + R_l} * V_{cc} \quad (4)$$

Despejando R_s :

$$R_s = \frac{R_l * (V_{cc} - V_{out})}{V_{out}} \quad (5)$$

Donde el dato R_l se obtiene del anexo 2:

$$R_l = 1.55 \text{ k}\Omega$$

Al igualar la ecuación 1 con 3 obtenemos:

$$27640(R_o)(ppm)^{-1.497} = \frac{R_l * (V_{cc} - V_{out})}{V_{out}}$$

$$ppm^{-1.497} = \frac{R_l(5 - V_{out})}{V_{out}} * \frac{1}{27640(R_o)}$$

$$\ln ppm^{-1.497} = \ln \left[\frac{R_l(5 - V_{out})}{V_{out}} * \frac{1}{27640(R_o)} \right]$$

$$(-1.497)\ln ppm = \ln \left[\frac{R_l(5 - V_{out})}{V_{out}} * \frac{1}{27640(R_o)} \right]$$

$$ppm = e^{\left[\frac{\ln \left[\frac{R_l(5 - V_{out})}{V_{out}} * \frac{10}{27640(R_o)} \right]}{-1.497} \right]} \quad (6)$$

2.5. Adquisición y visualización de datos

Para el control del sensor MQ – 8 y a su vez la adquisición de datos, el sensor se vinculó a una placa Arduino UNO, debido a la compatibilidad lo que permite conectar ambos elementos. El

Arduino Uno es una placa con un microcontrolador que posee 14 pines digitales de entrada y salida y 6 entradas analógicas, ver Figura 20. El Arduino puede ser alimentado por un puerto USB de tipo B, o por una conexión de fuente externa de poder. Para la programación de la tarjeta junto con el sensor, se realiza mediante de lenguaje C+ en la interfaz de Arduino IDE.

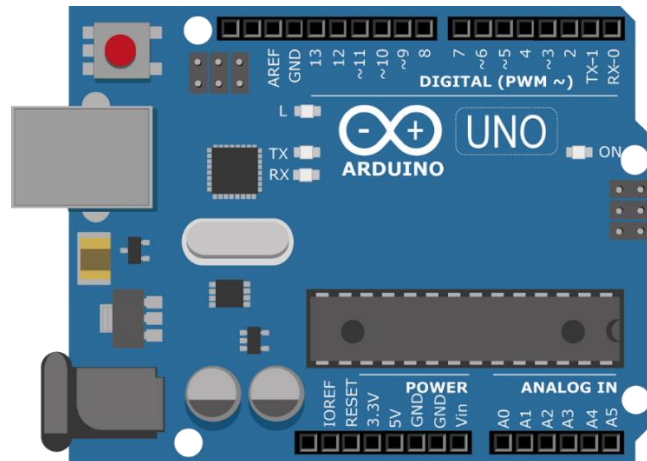


Figura 20. Placa Arduino uno

Fuente. Soloelectronicos .(2019). Controlando placas de IoT desde JavaScript. Recuperado de:

<https://soloelectronicos.com/2019/04/10/controlando-placas-de-iot-desde-javascript/>

Los datos adquiridos por el Arduino serán recibidos, procesados y visualizado mediante el software de programación visual gráfico LabVIEW 2021. Por último, los datos obtenidos serán guardado en una macro de Microsoft Excel.

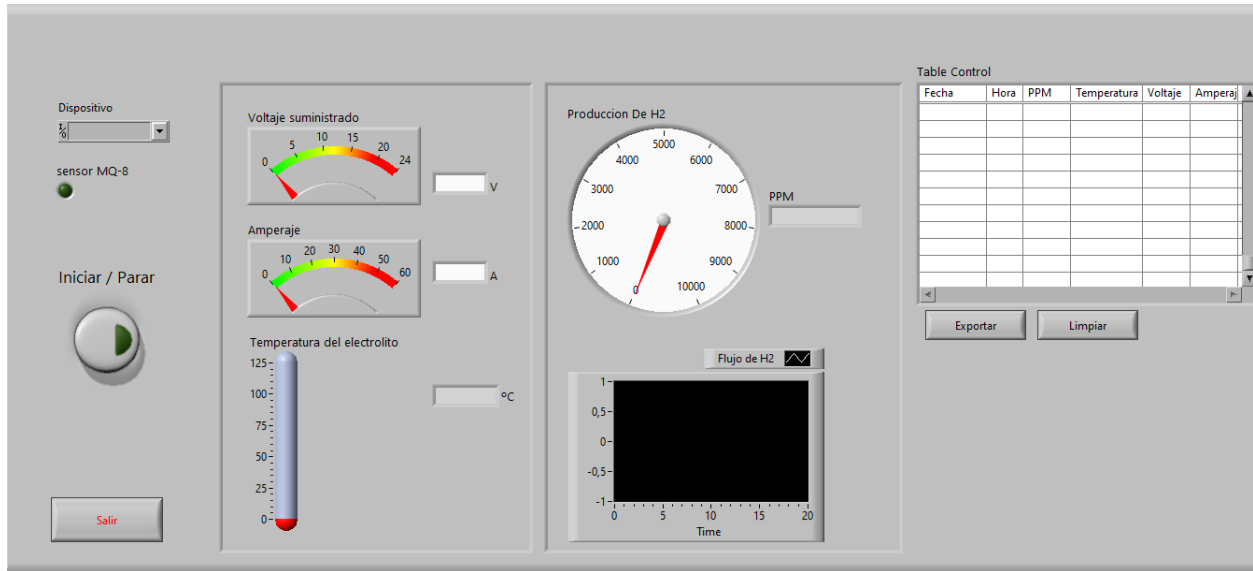


Figura 21. Panel de control de software de medición de ppm de hidrógeno.

Fuente. Autores

2.6. Componentes de la maqueta

Para análisis de este proyecto se requiere de 3 elementos, el primero es la estructura donde ira la todo el sistema de producción de hidrógeno y circuitos asentados, el segundo elemento es la celda de hidrógeno, y por último está el software que tiene el objetivo de revisar, procesar y permitir la visualización de los datos adquiridos durante las pruebas.

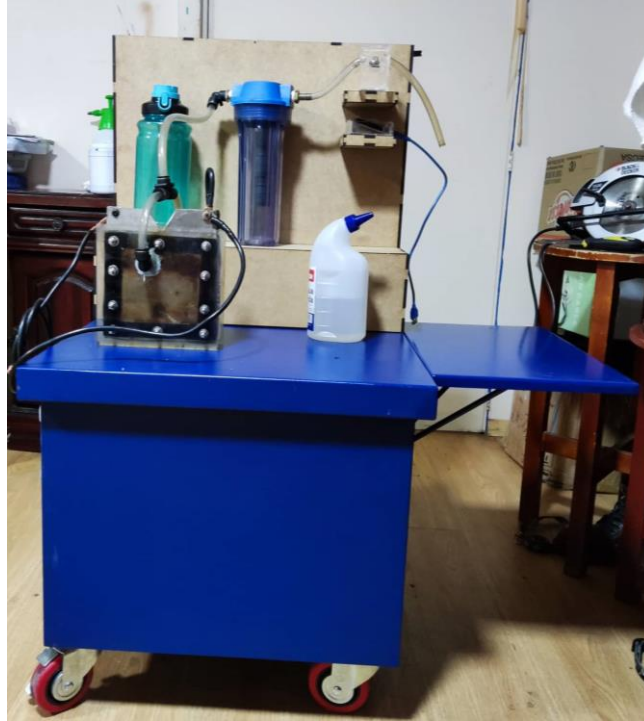


Figura 22. Sistema de producción de hidrógeno montado en la estructura.

Fuente. Autor

2.6.1. Mesa de trabajo de la maqueta

La base donde se hallarán ubicado el sistema de análisis de producción de hidrógeno se divide en 4 áreas:

- Área A: Zona dedicada para el reposo de la celda de hidrógeno de tipo seca.
- Área B: Zona donde se posicionarán el depósito del electrolito y el burbujeador.
- Área C: Zona donde se contendrá el sensor MQ-8 y el dispositivo Arduino.
- Área D: Bandeja con el objetivo de soportar una laptop donde se visualiza los datos registrados.

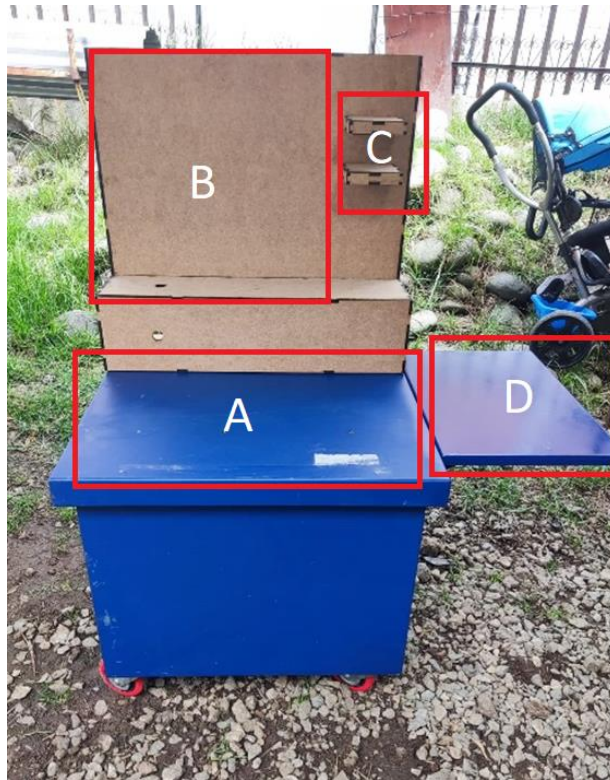


Figura 23. Distribución de las áreas de trabajo en la maqueta

Fuente. Autores

2.6.2. Software de medición de ppm de hidrógeno

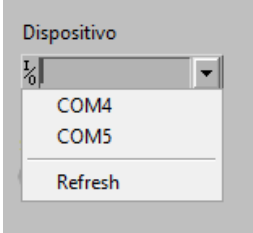
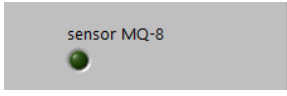


El software contiene un panel principal donde se hallan distribuidos los indicadores y controladores correspondientes para realizar la medición del hidrógeno y control de la senda. este panel sea dividido en cuatro zonas:

Zona A: Se encuentra los indicadores y controladores que se deben considerar antes de iniciar las pruebas. Las funciones de cada uno se hallan explicadas en la .

Tabla 16

Elementos de la zona A del panel de control del software.

Elementos	Función	Representación
-----------	---------	----------------

Selección de dispositivo	<p>Controlador donde se establece la comunicación con el puerto al que se halla conectado el Arduino</p>	
Led del sensor de MQ-8	<p>El led se prendera cuando el sensor capte señales</p>	
Botón de inicio y pare	<p>Este botón colocarlo en posición de inicio, el programa iniciará a registrar los datos y se podrá visualizar en los indicadores de la zona C del panel</p> <p>El segundo caso, parar, hace referencia a que el programa dejara de registrar y mostrar los datos</p>	
Botón de salir	<p>Tiene la función de cerrar por completo el programa</p>	

Nota.

Zona B: En esta zona se hallan los controladores de datos sobre el voltaje y amperaje, los cuales deberán ser ingresados de forma manual para su almacenamiento. Además de contar en la parte inferior con un indicador de temperatura del electrolito.

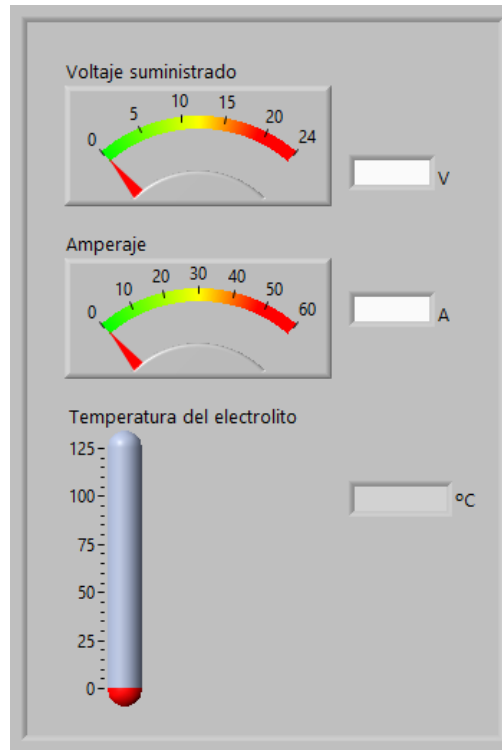


Figura 24. Componentes con respecto a la zona B del tablero de control del software.

Fuente. Autor

Zona C: Se encuentran los indicadores del nivel de hidrógeno generado. En la parte superior se halla un medidor que proporciona la cantidad de ppm de gas de hidrógeno registradas por el sensor; en la parte inferior se presenta una gráfica que presenta el nivel de producción de hidrógeno con respecto al tiempo.

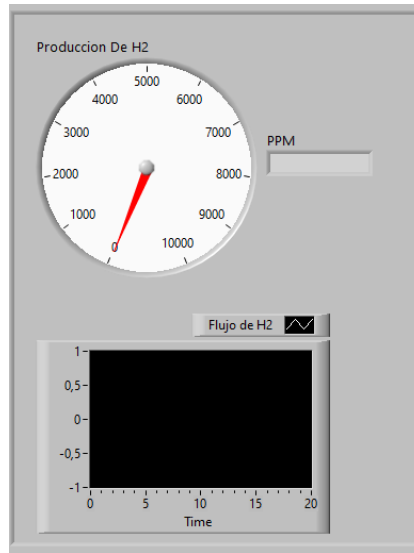


Figura 25. Elementos de visualización del nivel de producción de hidrógeno.

Fuente. Autor

Zona D: Se encuentra la tabla de control donde se registran los datos obtenidos por el sensor, esta tabla almacenará los datos automáticamente. En caso de que se requiera guardar los datos se puede pulsar el botón de exportar lo cual abrirá con acceso directo a Microsoft Excel donde los datos registrados serán guardados. Por otro lado el botón de limpiar permitirá borrar todos los datos de la tabla y reiniciar la adquisición de los datos.

8. Seleccione el puerto de comunicación con el Arduino en el software.
9. Revisar que el led del sensor MQ-8 se halle encendido, al igual que el led del panel de control.
10. Dejar que el sistema caliente por 3 minutos como mínimo.
11. Registrar los valores de voltaje y amperaje con los que se trabajara para la prueba.
12. Pulsar el botón de inicio.
13. Encender o conectar la fuente de energía (cargador de baterías o batería).

Para guardar los datos se recomienda que:

1. Detener el registro de datos dándole al botón de inicio / parar.
2. Desconectar/apagar la fuente de energía.
3. Pulsar el botón de exportar.
4. Se abrirá un documento de Excel con los datos ya organizados.
5. Guardar el documento. Asegurarse de revisar la ubicación de donde guarda el archivo.
6. Al guardar el documento, este se cerrará de forma inmediata.

Para reiniciar las pruebas:

1. Pulse el botón de limpiar.
2. De ser necesario cambie el electrolito, o reajuste.
3. Pulse el botón de iniciar.
4. Conecte/encienda la fuente de energía.

2.7.1. Precauciones

- Antes de iniciar las pruebas se debe verificar el estado de los componentes, realizar un examen visual, esto con el fin de detectar posibles fugas, daños en la estructura y alteraciones en los circuitos.

- Procure que el dispositivo o computadora no se encuentre cerca de la celda ni de los componentes para ello se realizó una bandeja capaz de soportar tal elemento.
- Para iniciar las pruebas primero debe recargar el depósito del líquido, El líquido ingresado debe estar mezclado con electrolito a usar.
- Conecte el Arduino a su dispositivo y procure que el software lo haya detectado. En caso de iniciar el programa sin haber identificado el puerto del Arduino, deberá cerrar el programa y reiniciarlo.
- Antes de iniciar el registro de datos. el sensor necesita un tiempo de calentamiento el cual se recomienda dejarlo en un tiempo de 3 minutos como mínimo.
- En caso de realizar pruebas junto a un cargador de baterías procure conectar los cables positivos y negativos con el cargador apagado.
- Procure que el nivel del líquido en el burbujeador no alcance a la manquera que conecta al sensor, esto puede generar un corto en sensor.
- Al realizar pruebas con amperajes altos tenga precaución con la temperatura.

2.8.Diseño experimental

Por medio de la técnica estadística: diseño experimental, se busca identificar el efecto del amperaje suministrado en el nivel de producción de H_2 por medio de electrolisis en una celda de combustible. Para ello se debe plantear los factores a estudiar y considerar para el desarrollo de experimento.

2.8.1. Factores de entrada

Son aquellas variables que se investigan para ver cómo afecta o cómo influye en las variables de respuestas. En este proyecto se considera al amperaje como el principal factor que interviene en el nivel de producción de hidrógeno.

2.8.2. Factores de control

Los factores de control como su nombre indica, son aquellos factores controlados o establecidos con valores fijos, en este caso son:

- Tipo de electrolito
- Cantidad de electrolito suministrado
- Estado físico de la celda

2.8.3. Factores de ruido

Estos valores no se pueden controlar por lo cual se trata de mantener valores constantes durante el desarrollo del experimento.

- Presencia de hidrógeno en ambiente
- Temperatura ambiental

2.8.4. Factores de respuesta

El factor de la cantidad de ppm de gas hidrógeno generadas es lo que se espera obtener con este experimento.

2.8.5. Rango de operación de los factores

Para el experimento se planteó la siguiente configuración de rangos para el factor de estudio, ver .

Tabla 17

Rangos de operación de los factores de estudio.

Factor	Mínimo	Medio	Máximo
Tipo de carga	Carga lenta	Carga rápida	Pulso de carga
Amperaje	12 [A]	20 [A]	60 [A]

Nota.

2.9. Procedimiento de medición

Para el proceso de medición se estableció un total de 9 corridas experimentales, estableciendo 3 corridas por nivel de amperaje.

2.9.1. Selección del electrolito

El factor del electrolito puede alterar el nivel de obtención de volumen de gas hidrógeno, existen diferentes sustancias que cumplen con los requisitos para conducir electricidad por la celda. Los electrolitos más usados son

- Hidróxido de potasio (KOH).
- Hidróxido de sodio ($NaOH$).
- Sal o cloruro de sodio ($NaCl$).
- Bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$)

En este caso se implementa el uso de la sal como electrolito debido a la facilidad de obtención de este material. Además Quezada. E y Torres. D (2014) señalan que durante las primeras pruebas con sal como electrolito el poco volumen de hidrógeno que se obtiene si es explosivo, que a diferencia del bicarbonato de sodio en las primeras pruebas el gas producido no obtuvo gran eficiencia. Revisar Anexo 1.


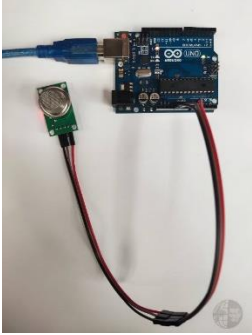

Por otro lado, las opciones de hidróxido de potasio e hidróxido de sodio al formar parte del grupo de hidróxido los vuelve las mejores opciones, no obstante su obtención se dificulta debido a su no libre distribución ni compra por lo cual para conseguirlos se debe solicitar una aprobación para el manejo de sustancias catalogadas sujetas a fiscalización por parte del Ministerio del gobierno.

2.9.2. Materiales y herramienta

El equipo y materiales necesario para la realización de las corridas se detalla en la .

Tabla 18

Materiales y herramientas

Material	Cantidad	Foto
Circuito de producción de hidrógeno	1	
Circuito de medición de hidrógeno	1	
Computadora	1	
Sal	1 kg	

Agua destilada 9 litros



Cargador de 200 A
para baterías de 12V, 1
marca Truper



Nota.

CAPITULO 3: ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta el análisis estadístico del desarrollo experimental, y a su vez se presentan los resultados de estos, determinado la configuración más adecuada para la producción de hidrógeno mediante el generador de tipo seco.

3.2. Recopilación de datos para el estudio estadístico

Para la obtención de las muestras que son de importancia para el desarrollo del estudio estadístico se lo realizo mediante el registro obtenido del sensor MQ-8, dentro de las cuales se obtuvo el particulado por millón del hidrógeno, el número de muestra con fecha y hora y el valor de la corriente, esto tomado del cargador de baterías Truper.

Como se especificó en el capítulo 2, el diseño experimental consiste en 9 corridas experimentales, estableciendo 3 corridas experimentales por cada modo de carga que proporciona el cargador de baterías Truper, teniendo carga lenta, carga rápida y pulso de carga.

3.3. Valores obtenidos a carga lenta

3.3.1. Primera corrida experimental a carga lenta

La primera corrida experimental a carga lenta cuenta con un número total de 675 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 12 minutos. Dentro de este tiempo está contemplado el calentamiento del sensor y la finalización de las todas, obteniendo los siguientes datos estadísticos; revisar Tabla 19.

Tabla 19

Valores estadísticos de la primera corrida experimental a carga lenta

Valor estadístico	Valor
Mínimo	3 ppm
Máximo	22869 ppm
Media	5374 ppm
Media recortada	4884 ppm

Nota.

Para visualizar de mejor manera cual es el comportamiento de la generación de hidrógeno a través del tiempo se presenta la siguiente gráfica, en donde podemos identificar que la gráfica presenta una etapa de producción baja de hidrógeno desde el tiempo 0 hasta los 200 esto debido a la etapa de calentamiento del sensor, pero después de esta etapa se puede encontrar una subida en la producción, alcanzando un punto máximo de producción de 22869 ppm, y por último, la producción de hidrógeno decae debido a que las sales presentes en el electrolito comienzan su etapa de oxidación, así dejando de producir la reacción de electrolisis.

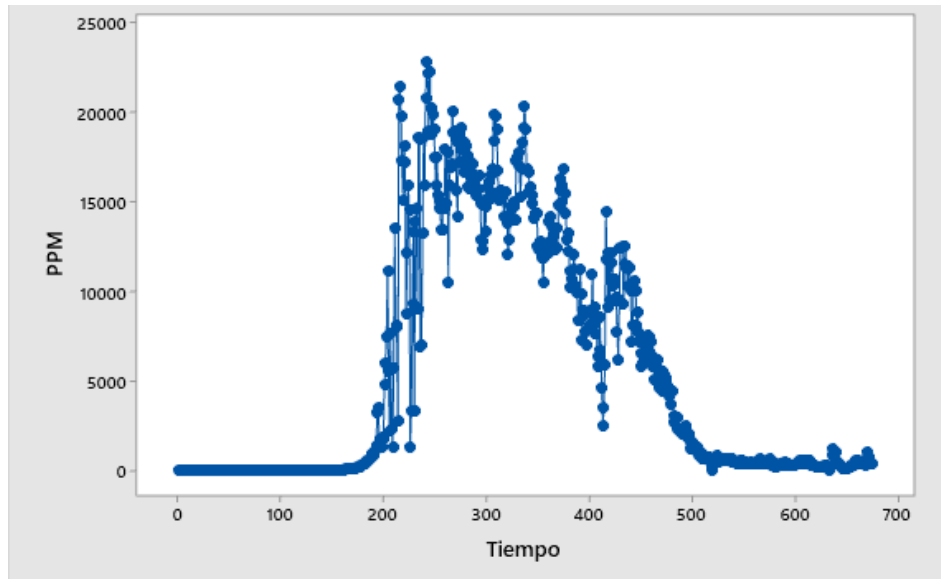


Figura 27. Dispersión de PPM vs Tiempo (primera corrida experimental a carga lenta)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 12 A.

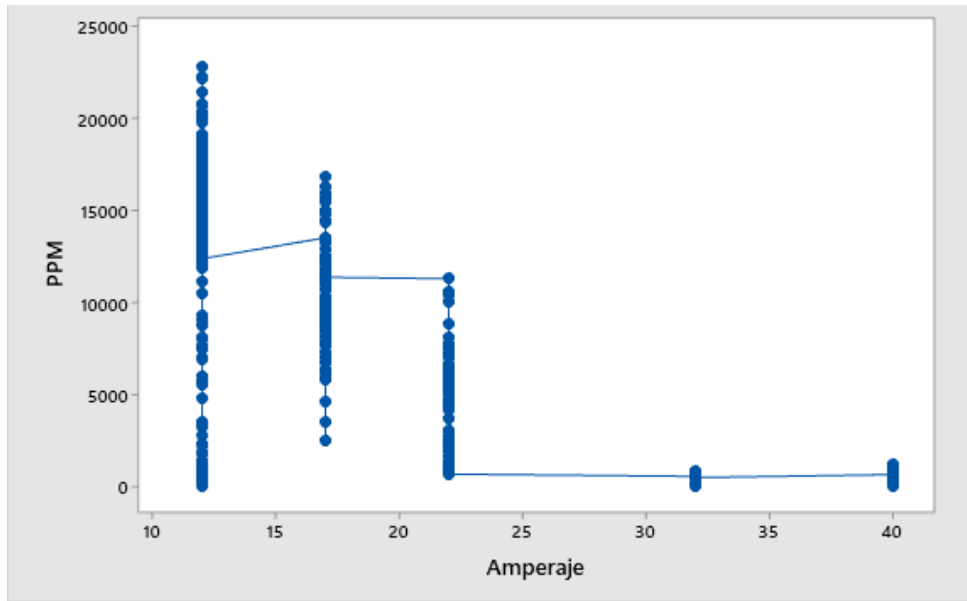


Figura 28. Dispersion de PPM vs Amperaje (primera corrida experimental a carga lenta)

Fuente. Autores

3.3.2. Segunda corrida experimental a carga lenta

La segunda corrida experimental a carga lenta cuenta con un número total de 409 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 7 minutos, obteniendo que la máxima producción de hidrógeno fue 14829 ppm, más valores estadísticos revise .

Tabla 20

Valores estadísticos de la segunda corrida experimental a carga lenta

Valor estadístico	Valor
Mínimo	0 ppm
Máximo	14829 ppm
Media	1527 ppm

Nota.

La Figura 29 nos representa el comportamiento de la generación de hidrógeno a través del tiempo, en donde podemos identificar que la etapa de calentamiento es más baja que en la prueba anterior pero de igual manera la producción de hidrógeno es casi nula. Una vez que el generador comienza a realizar la reacción de manera más constante podemos visualizar que comienza a subir la producción de hidrógeno, teniendo un pico máximo de 14829 ppm, y luego presentando un periodo de decaimiento debido a la oxidación de las sales en el electrolito.

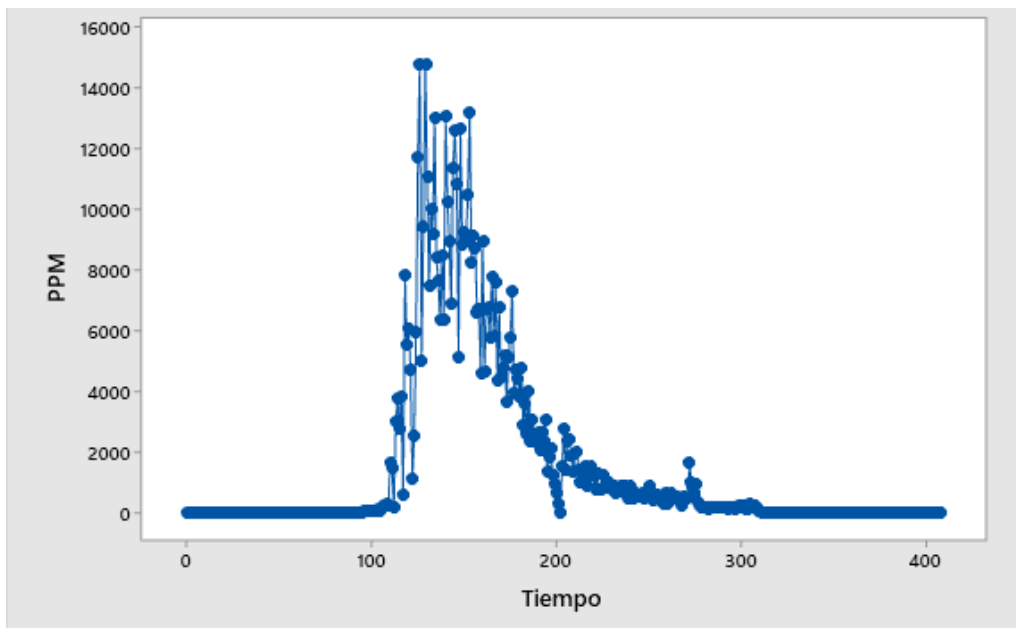


Figura 29. Dispersión de PPM vs Tiempo (segunda corrida experimental a carga lenta)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 20 A.

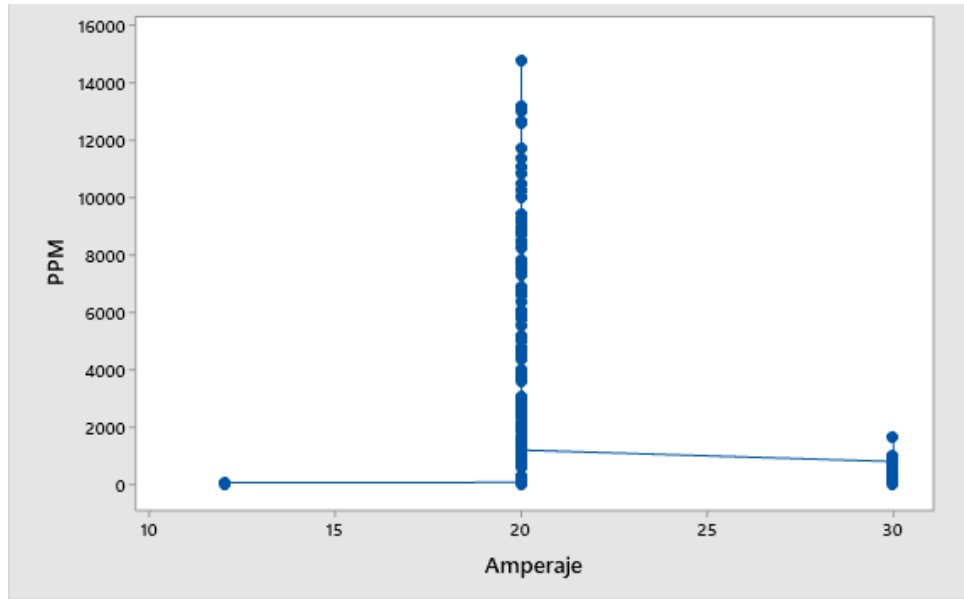


Figura 30. Dispersión de PPM vs Amperaje (segunda corrida experimental a carga lenta)

Fuente. Autores

3.3.3. Tercera corrida experimental a carga lenta

La tercera corrida experimental a carga lenta cuenta con un número total de 412 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 7 minutos, donde se obtuvo los siguientes valores estadísticos; ver .

Tabla 21

Valores estadísticos de la tercera corrida experimental a carga lenta

Valor estadístico	Valor
Mínimo	0 ppm

Máximo	21401 ppm
Media	1079 ppm
Media recortada	461 ppm

Nota.

Gracias al Figura 31 se identifica que la producción de hidrógeno es casi nula en sus primeros minutos al igual que la segunda corrida experimental, esto debido a que la reacción que se da en el generador es más lenta, a su vez obtenemos que la generación de hidrógeno presenta un pico máximo de 21401 ppm, pero el comportamiento no es regular, ya que se puede encontrar caídas y subidas en la generación, esto es provocado por las fluctuaciones del gas, ya que no es constante en su caudal, y por ultimo presenta su caída debido a la oxidación de las sales.

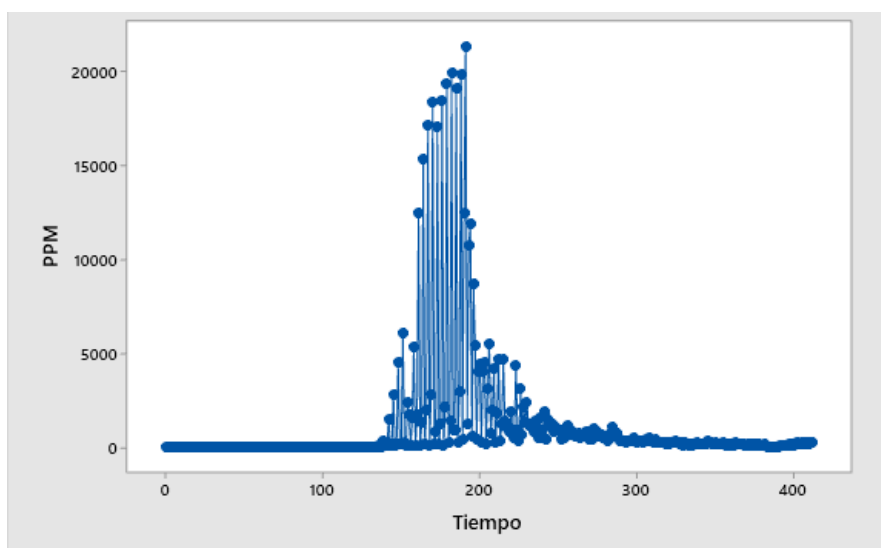


Figura 31. Dispersión de PPM vs Tiempo (tercera corrida experimental a carga lenta)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 14 A.

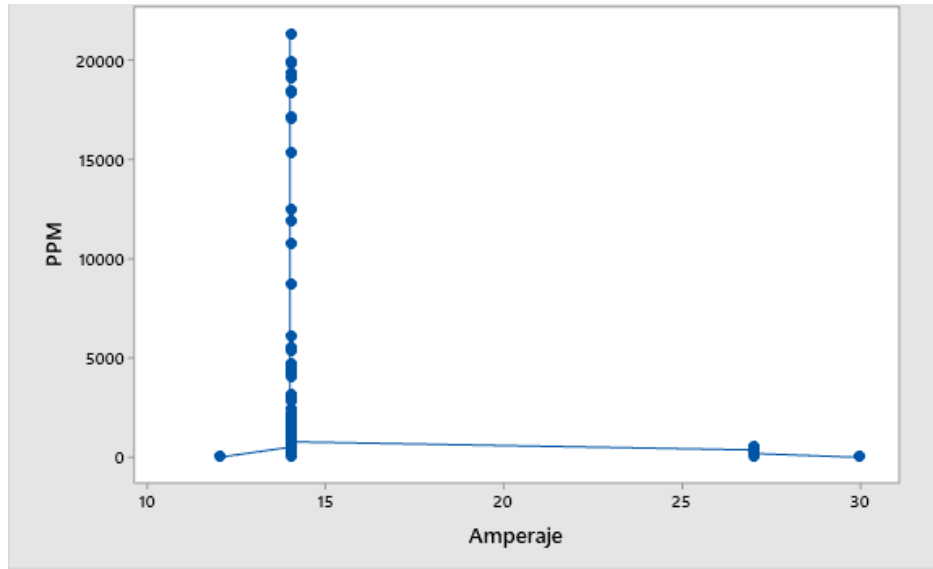


Figura 32. Dispersión de PPM vs Amperaje (tercera corrida experimental a carga lenta)

Fuente. Autores

3.4. Valores obtenidos a carga rápida

3.4.1. Primera corrida experimental a carga rápida

La primera corrida experimental a carga rápida cuenta con un número total de 306 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 6 minutos, obteniendo los siguientes datos estadísticos, Ver .

Tabla 22

Valores estadísticos de la primera corrida experimental a carga rápida

Valor estadístico	Valor
-------------------	-------

Mínimo	0 ppm
Máximo	14138 ppm
Media	879 ppm
Media recortada	392 ppm

Nota.

Para visualizar de mejor manera cual es el comportamiento de la generación de hidrógeno a través del tiempo se presenta la siguiente gráfica, en donde encontramos que se presenta una etapa de calentamiento del electrolito alta, por lo tanto, no se obtiene alguna generación de hidrógeno. Una vez alcanzado la etapa de calentamiento, la producción de hidrógeno es elevada por un corto periodo de tiempo alcanzando su pico máximo en 14138 ppm, y luego comienza su decaimiento esto debido a que las altas corrientes oxidan las sales en menor tiempo.

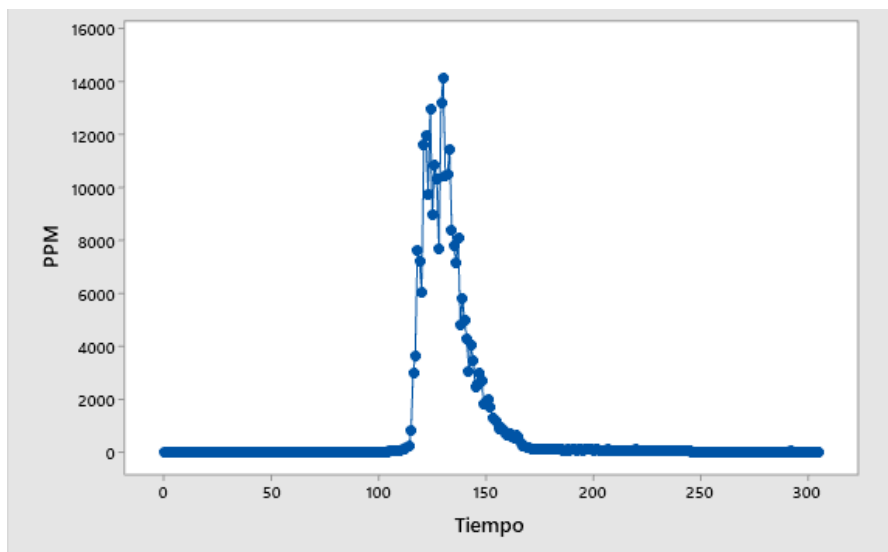


Figura 33. Dispersión de PPM vs Tiempo (primera corrida experimental a carga rapida)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 25 A.

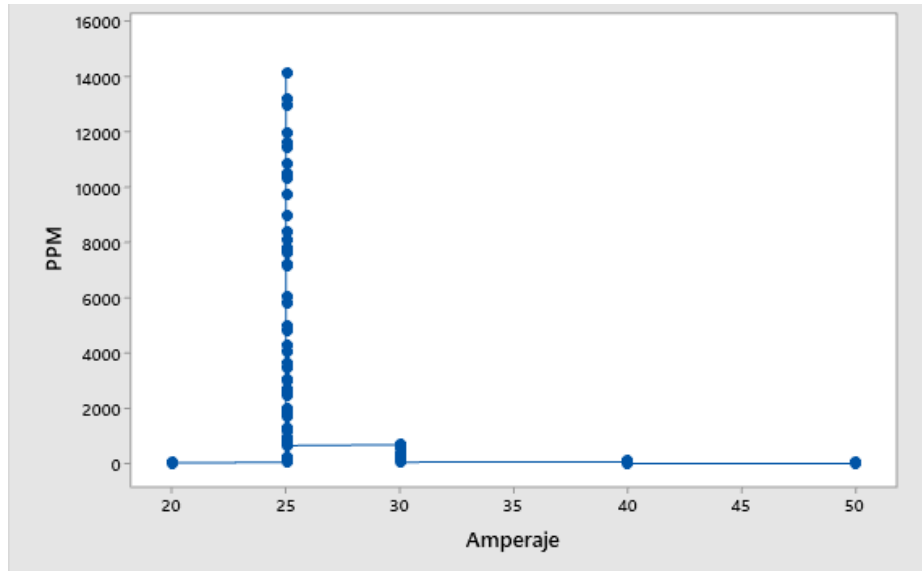


Figura 34. Dispersión de PPM vs Amperaje (primera corrida experimental a carga rápida)

Fuente. Autores

3.4.2. Segunda corrida experimental a carga rápida

La segunda corrida experimental a carga rápida cuenta con un número total de 532 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 9 minutos, donde los datos estadísticos se presentan en la .

Tabla 23

Valores estadísticos de la segunda corrida experimental a carga rápida

Valor estadístico	Valor

Mínimo	0 ppm
Máximo	17895 ppm
Media	1424 ppm
Media recortada	818 ppm

Nota.

En la siguiente grafica podemos visualizar que de igual manera se presenta una etapa de calentamiento del electrolito alta, por lo tanto, no se obtiene alguna generación de hidrógeno. Una vez alcanzado este punto, la generación de hidrógeno se eleva a unas 17895 ppm, la producción de hidrógeno es elevada por un corto periodo de tiempo, y luego comienza su decaimiento esto debido a que las altas corrientes oxidan las sales en menor tiempo.

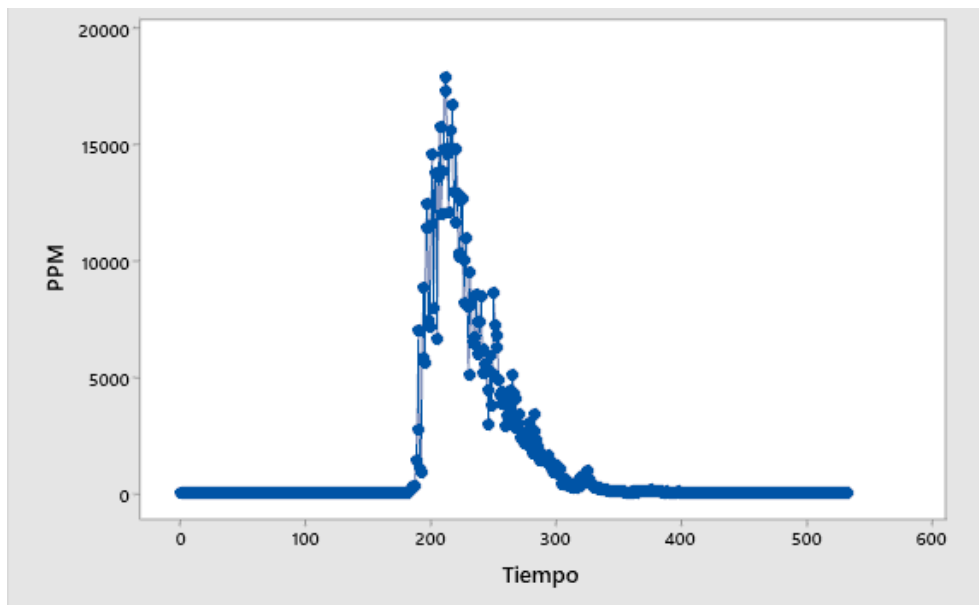


Figura 35. Dispersión de PPM vs Tiempo (segunda corrida experimental a carga rapida)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 25 A.

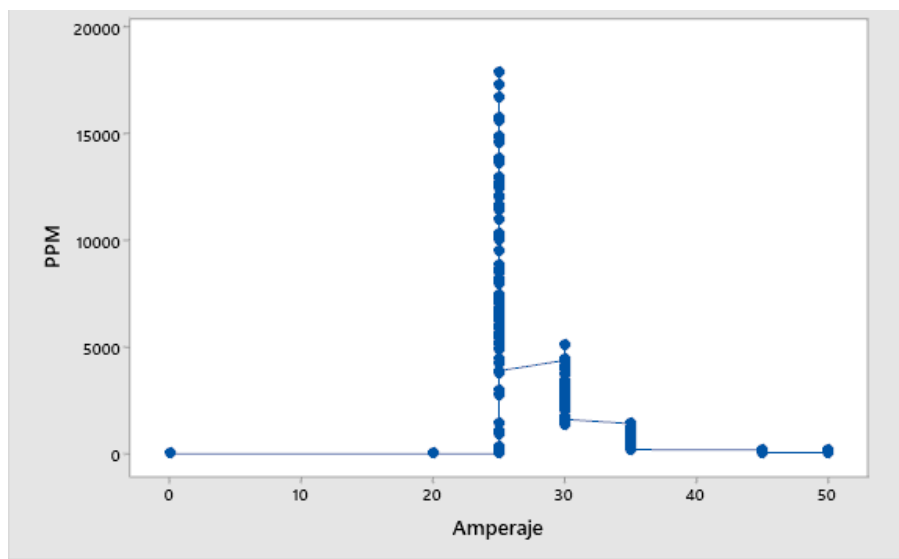


Figura 36. Dispersión de PPM vs Amperaje (segunda corrida experimental a carga rapida)

Fuente. Autores

3.4.3. Tercera experimental a carga rápida

La tercera corrida experimental a carga rápida cuenta con un número total de 317 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 5 minutos, el tiempo de muestreo se vio reducido debido al rápido consumo del electrolito. Los resultados de esta prueba demostraron los siguientes datos estadísticos, Ver .

Tabla 24

Valores estadísticos de la tercera corrida experimental a carga rápida

Valor estadístico	Valor
Mínimo	0 ppm
Máximo	21883 ppm
Media	1325 ppm
Media recortada	1057 ppm

Nota.

Para visualizar de mejor manera cual es el comportamiento de la generación de hidrógeno a través del tiempo se presenta la siguiente gráfica, en donde encontramos que se presenta una etapa de calentamiento del electrolito alta, por lo tanto, no se obtiene alguna generación de hidrógeno. Una vez alcanzado la etapa de calentamiento, la producción de hidrógeno es elevada por un corto periodo de tiempo teniendo un pico máximo de 6932 ppm, y luego comienza su decaimiento, aunque en la parte final del proceso podemos encontrar un punto explosivo esto debido al estancamiento y libramiento del hidrógeno a golpe.

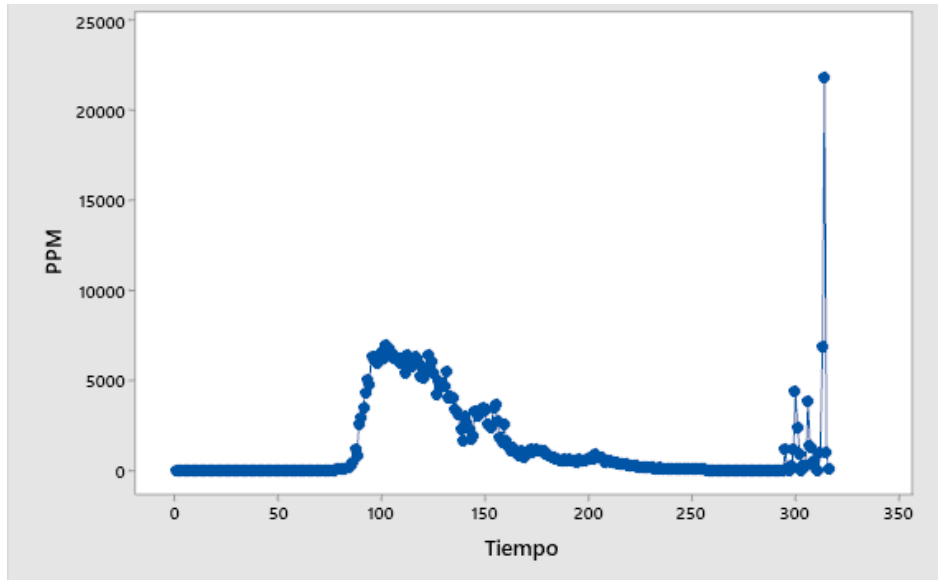


Figura 37. Dispersión de PPM vs Tiempo (tercera corrida experimental a carga rapida)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 25 A.

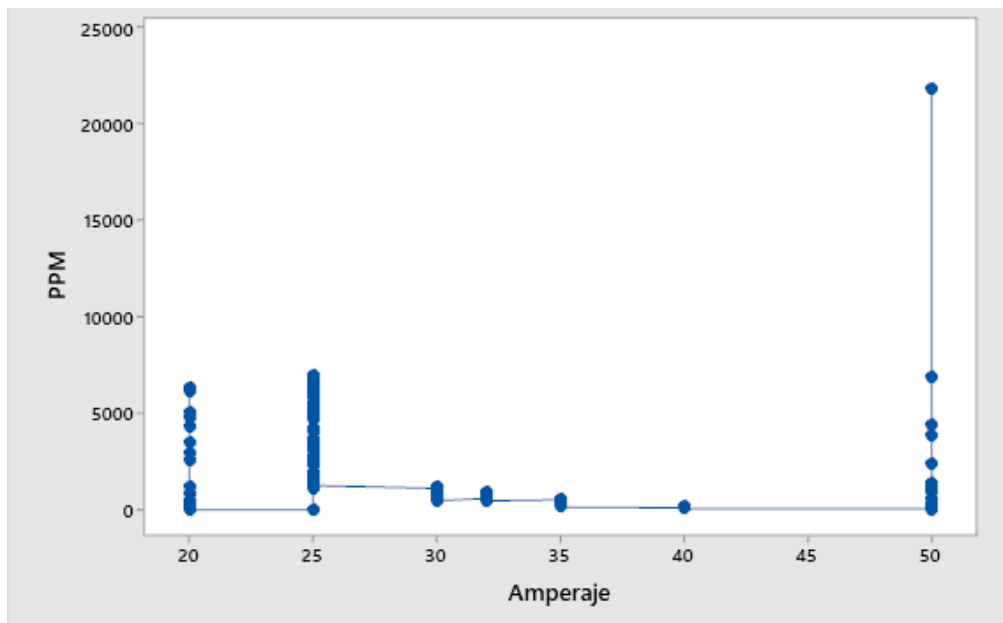


Figura 38. Dispersión de PPM vs Amperaje (tercera corrida experimental a carga rapida)

Fuente. Autores

3.5. Valores obtenidos a pulsos de carga

3.5.1. Primera corrida experimental a pulsos de carga

La primera corrida experimental a pulsos de carga cuenta con un número total de 260 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 4 minutos. La toma de datos se lo realiza en cortos periodos de tiempo esto debido a que al alimentar con corriente extremadamente alta la reacción se produce de manera explosiva, así calentando excesivamente el generador de hidrógeno, por lo tanto se obtiene los siguientes datos, ver :

Tabla 25

Valores estadísticos de la primera corrida experimental a pulsos de carga

Valor estadístico	Valor
Mínimo	0 ppm
Máximo	7290 ppm
Media	787 ppm
Media recortada	492 ppm

Nota.

Para visualizar de mejor manera cual es el comportamiento de la generación de hidrógeno a través del tiempo se presenta la siguiente gráfica, en donde encontramos que se presenta una etapa de calentamiento corta y presentando una elevación en la generación de hidrógeno de golpe, alcanzando las 7290 ppm y disminuye en un corte periodo de tiempo.

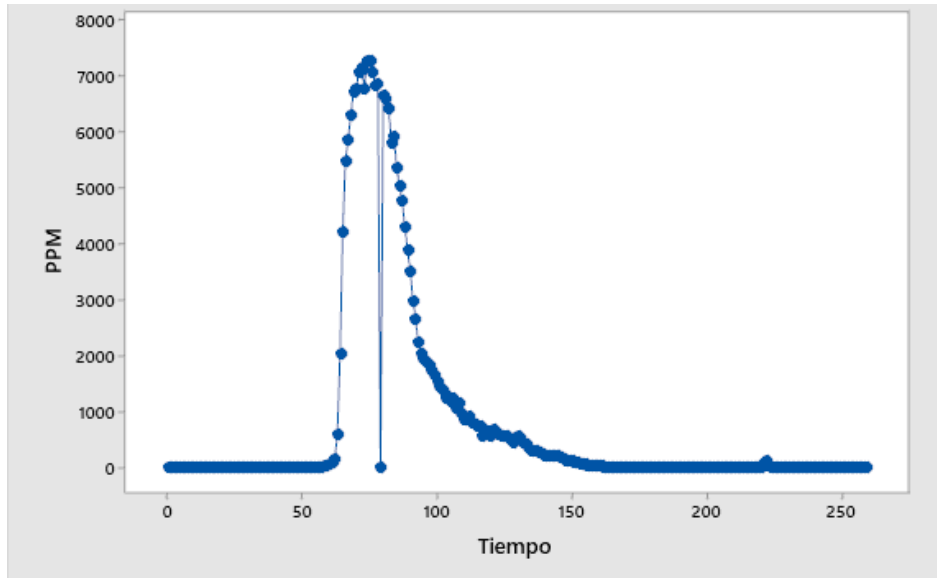


Figura 39. Dispersión de PPM vs Tiempo (primera corrida experimental a pulsos de carga)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 45 A.

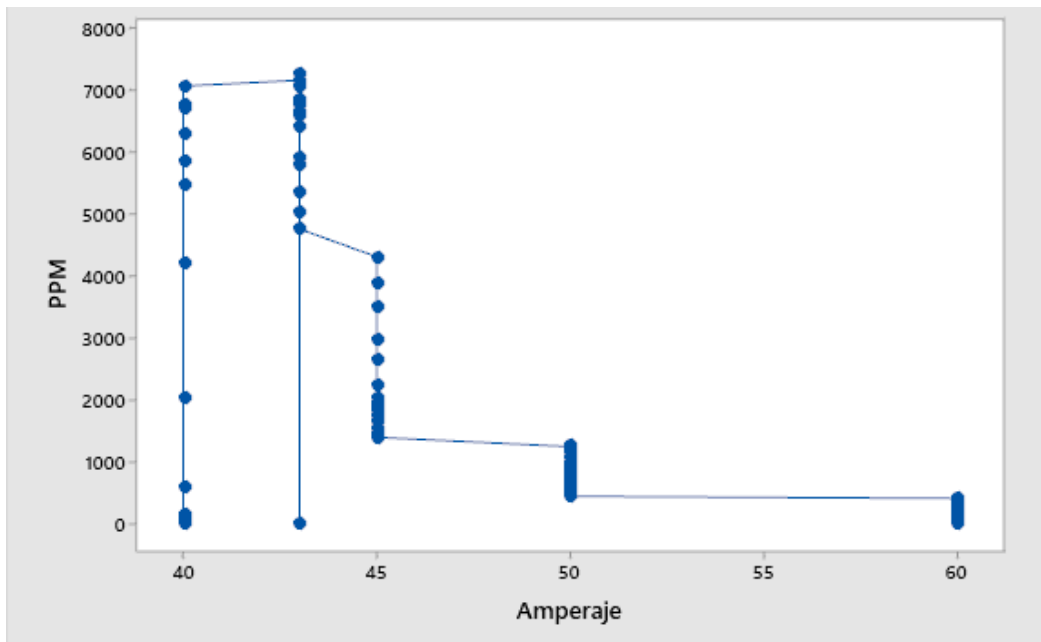


Figura 40. Dispersión de PPM vs Amperaje (primera corrida experimental a pulsos de carga)

Fuente. Autores

- **Segunda corrida experimental a pulsos de carga**

La segunda corrida experimental a pulsos de carga cuenta con un número total de 403 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 6 minutos. Los datos resultantes fueron procesados y se obtuvo los siguientes valor estadísticos, ver .

Tabla 26

Valores estadísticos de la segunda corrida experimental a pulsos de carga

Valor estadístico	Valor
Mínimo	0 ppm
Máximo	3120 ppm
Media	271.2 ppm
Media recortada	167.3 ppm

Nota.

De igual manera que la anterior corrida experimental encontramos que se presenta una etapa de calentamiento corta y presentando una elevación en la generación de hidrógeno de golpe, con unos máximos de 3120 ppm y disminuye en un corte periodo de tiempo.

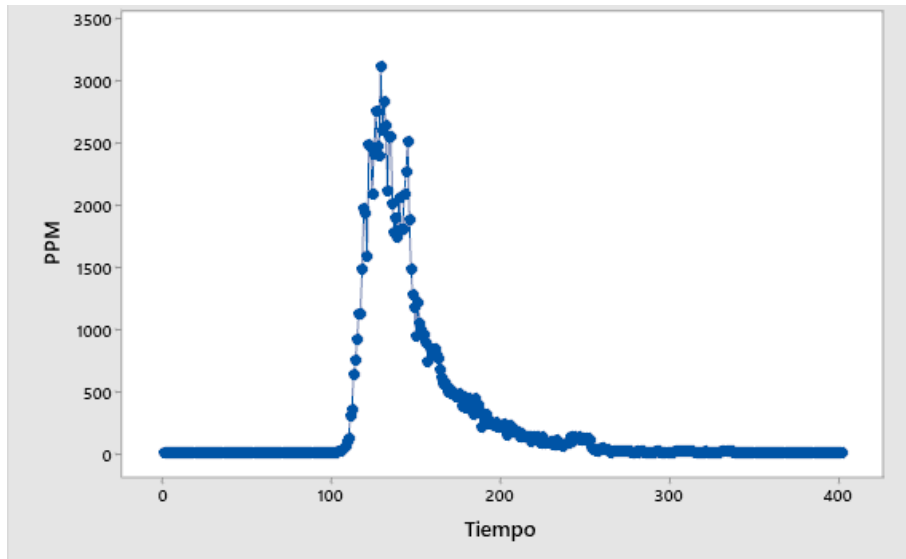


Figura 41. Dispersión de PPM vs Tiempo (segunda corrida experimental a pulsos de carga)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 40 A.

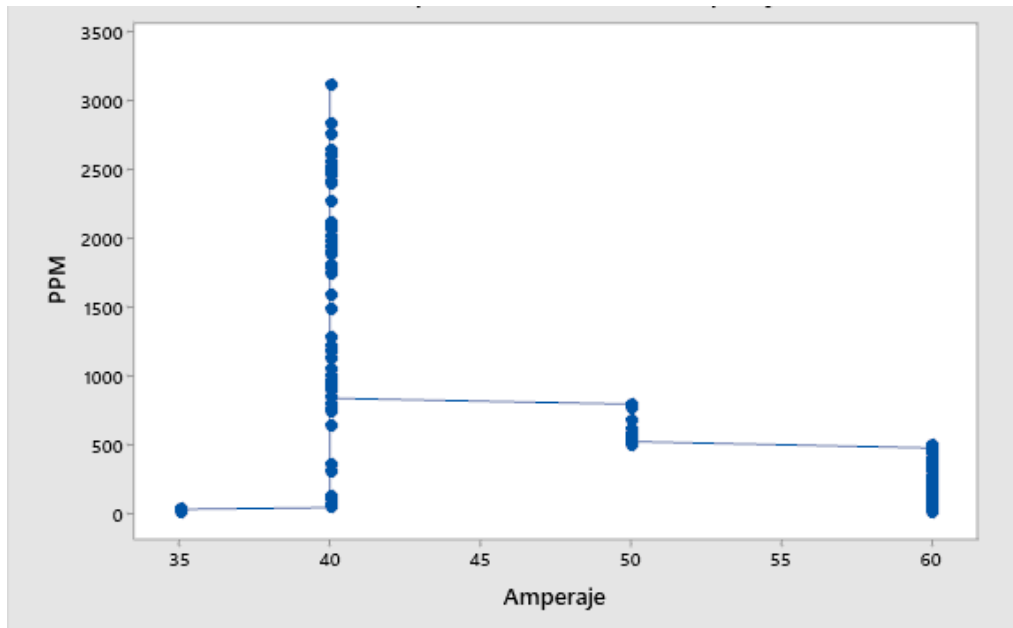


Figura 42. Dispersión de PPM vs Amperaje (segunda corrida experimental a pulsos de carga)

Fuente. Autores

3.5.2. Tercera corrida experimental a pulsos de carga

La tercera corrida experimental a pulsos de carga cuenta con un número total de 455 valores registrados por el sensor, dentro de un periodo de 7 minutos. Los valores estadísticos resultantes fueron, ver .

Tabla 27

Valores estadísticos de la tercera corrida experimental a pulsos de carga

Valor estadístico	Valor
Mínimo	0 ppm
Máximo	1205 ppm
Media	157.5 ppm
Media recortada	117.7 ppm

Nota.

Del mismo modo la gráfica a continuación presenta el mismo comportamiento que los anteriores, calentamiento corto y momento explosivo en la generación, obteniendo un pico máximo de 1205 ppm y disminuyendo en un corte periodo de tiempo.

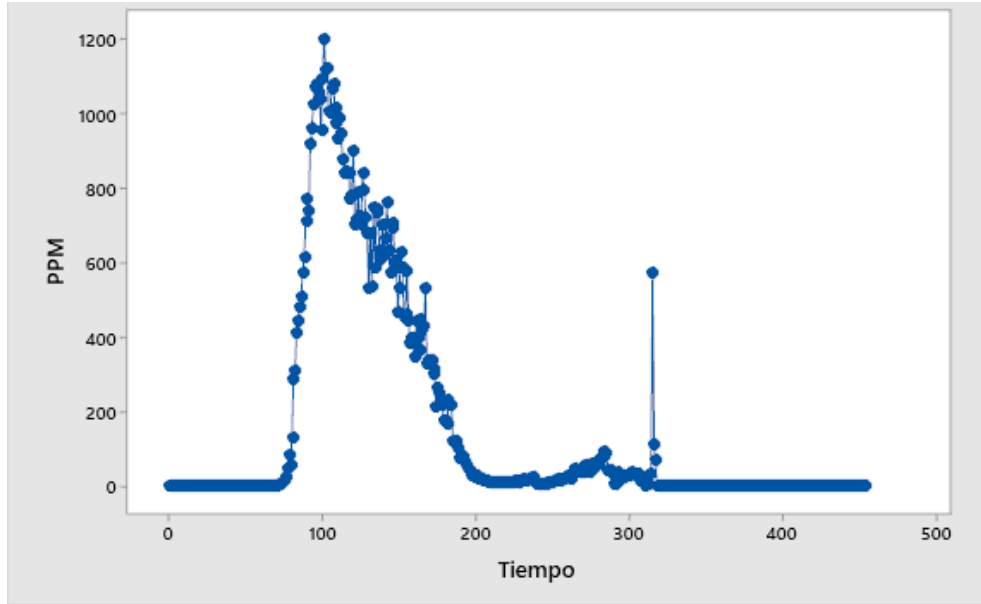


Figura 43. Dispersión de PPM vs Tiempo (tercera corrida experimental a pulsos de carga)

Fuente. Autores

A su vez podemos visualizar los datos de la generación de hidrógeno con respecto a la corriente suministrada al generador, en donde podemos distinguir que la mayor generación se presenta a una corriente de 50 A.

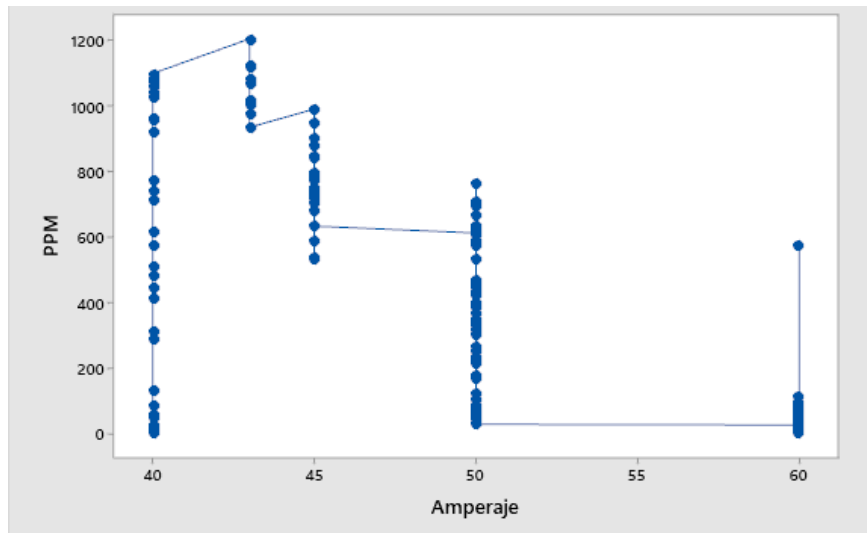


Figura 44. Dispersión de PPM vs Amperaje (tercera corrida experimental a pulsos de carga)

Fuente. Autores

3.6.Resultados

3.6.1. Diseño experimental a carga lenta

El diseño experimental realizado a carga lenta nos da como mejores resultados en la producción de hidrógeno, debido a que la generación se da de una manera más progresiva, comenzando con una corriente baja y aumentando progresivamente conforme se da el consumo del electrolito, además que se puede visualizar en la gráfica a continuación que la generación se da por un periodo más largo, ya que el impacto no es repentino. Otro punto que destacar es que los máximos de las tres corridas experimentales están dentro del rango de una producción alta, teniendo en cada prueba 22869, 14829 y 21401 respectivamente, obteniendo una media de producción máxima de 19699 ppm.

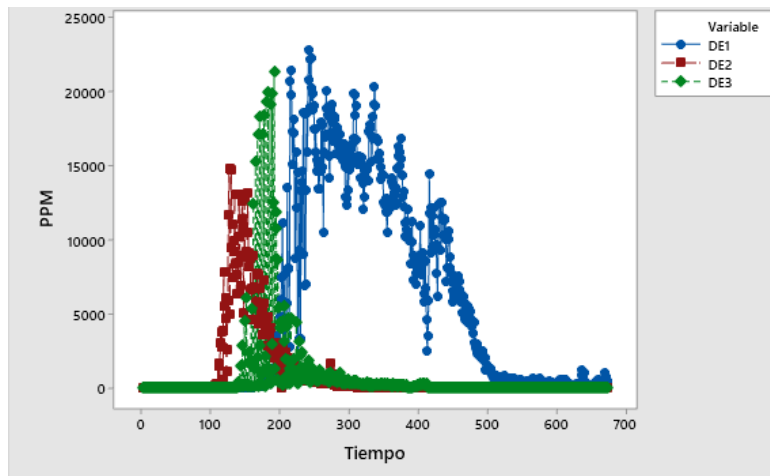


Figura 45. Dispersión de PPM a carga lenta vs Tiempo

Fuente. Autores

3.6.2. Diseño experimental a carga rápida

El diseño experimental realizado a carga rápida da como resultado una producción de hidrógeno aceptable, pero el inconveniente que presenta es que la alimentación de corriente inicial es alta, lo que nos da como resultado una degradación del electrolito más rápida con respecto a la prueba a carga lenta, por lo tanto el tiempo de muestreo va a disminuir. Dentro de esta prueba se puede

visualizar un comportamiento similar, teniendo periodos de calentamiento bajos y un crecimiento repentino en la producción, alcanzando su punto máximo y disminuyendo a la par.

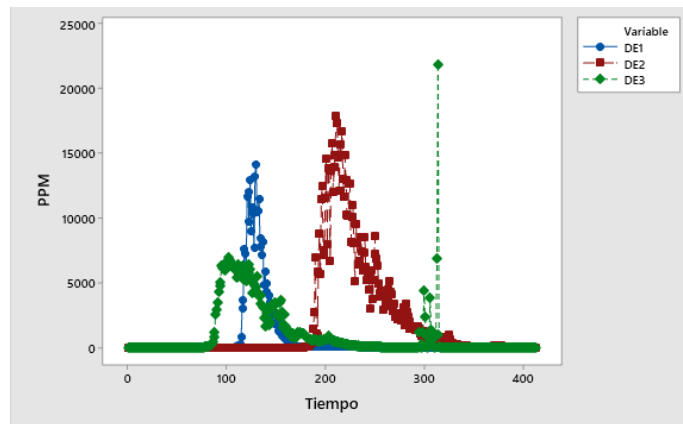


Figura 46. Dispersión de PPM a carga rápida vs Tiempo

Fuente. Autores

3.6.3. Diseño experimental a pulsos de carga

El diseño experimental a pulsos de carga es la peor de las tres disposiciones que nos presenta el cargador de baterías Truper, esto lo podemos ver reflejado en que la producción de hidrógeno es baja, teniendo un máximo entre las tres tomas de muestras de 7290 ppm, esto es debido principalmente a que la alimentación de corriente es excesivamente alta, ya que se parte de una corriente de alimentación inicial de 40 A, lo que afecta directamente en la degradación de las sales presentes en el electrolito, obteniendo una oxidación casi instantánea al momento de suministrar la corriente.

Otro punto en contra en este muestreo es que desprende una cantidad alta de calor residual por parte de los electrodos, lo que puede derivar en accidentes si no se toman las respectivas precauciones, además que las mangueras que conducen el hidrógeno no son aptas para temperaturas demasiadas altas.

Un punto por destacar de este modo es que la producción de hidrógeno se da casi al instante, presentando el menor tiempo de calentamiento, pero esto se ve opacado por la baja eficiencia de producción.

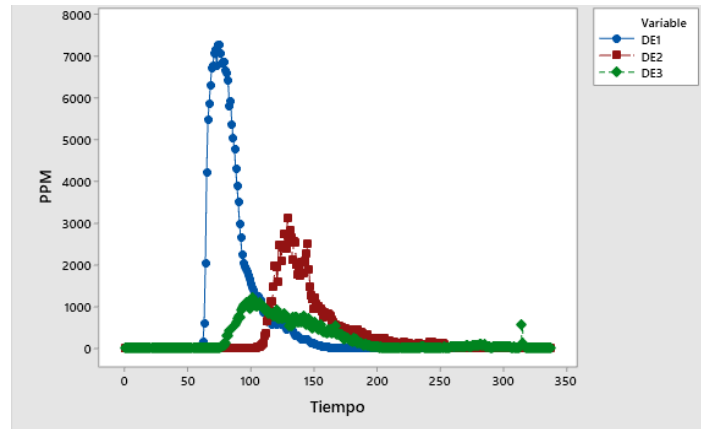


Figura 47. Dispersión de PPM a pulsos de carga vs Tiempo

Fuente. Autores

Conclusiones y recordaciones

4.1. Conclusiones

Con la finalización del proyecto se puede concluir que:

- Se en recalco las propiedades y ventajas que hacen del hidrógeno una de las mejores opciones como combustible alterno.
- Se aclaro el funcionamiento y buen desempeño del hidrógeno como combustible secundario en un motor de combustión interna, apoyando la idea del estudio del hidrógeno como suplemento de mejora a la mezcla de admisión.
- Se elaboro una maqueta de análisis para la celda de hidrógeno tipo seca en Inventor 2019, considerando el espacio de trabajo de la mesa y las dimensiones requeridas por la celda; se optó por el material MDF como soporte de los elementos de almacenamiento del electrolito y al circuito del sensor de medición de hidrógeno.
- Se diseño y programo un software mediante LabVIEW en conjunto con Arduino; que permite visualizar las ppm de hidrógeno que se producen según el amperaje suministrado mediante el cargador de baterías de 12V Truper.
- En base a las corridas experimentales se identificó que durante las pruebas a carga baja, el nivel de producción de hidrógeno alcanzo niveles altos, hasta los 22310 ppm, además que a diferencia de las pruebas a alta carga y carga pulsante, el tiempo de generación de hidrógeno a carga baja tiene una mayor duración, cerca de los 12 minuto, hasta que el electrolito se oxidase y el nivel de producción descendiera.
- En el segundo grupo de pruebas, a carga rápida, se alcanzó niveles de producción altos al igual que a carga lenta, sin embargo, esta al alcanzar una suministración de 35 A, las ppm del hidrógeno descendían de forma rápida, esto también se vio reflejado en las pruebas a carga pulsante.

- Se realizó pruebas en la celda de hidrógeno a diferentes cargas de amperaje alto, lo cual demostró que a medida que el amperaje aumente el nivel de hidrógeno generado crecerá más rápido hasta un punto donde la producción de hidrógeno deje de ser eficiente debido al consumo y quema de los minerales del electrolito.
- Trabajando con una carga lenta en la celda, la temperatura de la celda varía hasta +3°C que la temperatura ambiente. En carga rápida esta temperatura puede alcanzar hasta los +10°C y por último, en carga pulsante la celda puede sumar una temperatura de +30°C en 2 minutos de operación.

4.2. Recomendaciones

- Debido al alto amperaje suministrado, el electrolito se quemaba lo que produce que el fluido tome un estado espumoso de color café oscuro, por lo que se recomienda realizar un sistema de recirculación para el electrolito, esto a su vez puede llegar a mejorar el nivel de datos obtenidos durante pruebas.
- Al realizar pruebas con amperajes mayores a 12 A, es necesario el cambio de electrolito debido a la quema de los minerales por el calentamiento de las placas.
- Al realizar pruebas con amperajes altos, es necesario que el lavado de la celda sea desarmándola y sustrayendo toda la sustancia junto a los minerales quemados. Al armar la celda, es necesario dar un apriete adecuado para que no existan fugas durante las pruebas.
- Realizar el mantenimiento apropiado a la celda con la finalidad de evitar daños a esta durante las pruebas y así alargar su vida útil.
- Revisar el cableado del circuito del sensor MQ-8, ya que se pueden presentar anomalías que alteren el paso de corriente, alterando las señales del sensor y pudiendo causar un corto.

- Al iniciar el programa de medición, procure que el Arduino se halle conectado al dispositivo, de igual manera que el software lo haya reconocido. De no ser así e iniciar el programa, este no recibirá señal alguno a lo cual deberá cerrar por completo el programa y reiniciarlo.
- Al iniciar una prueba se recomienda medir el nivel de ppm de hidrógeno presentes en el ambiente, debido a que esto puede representar un margen de error a los datos,
- Es necesario dejar calibrar al sensor durante 3 minutos, ya que durante este tiempo el sensor estabilizara el rango de los datos captados.
- No generar chispa cerca de la caja que mantiene al sensor MQ-8, ya que debido al aislamiento del hidrógeno este puede generar un explosión que llegaría a afectar al sensor. En caso de querer realizar este tipo de prueba de creación de llama, se debe desconectar a la manguera que conduce el hidrógeno al sensor.

Referencias

- AEADE.(2021). SECTOR AUTOMOTOR en cifras. Recuperado de: <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2022/02/1.-Sector-en-Cifras-Resumen-Enero.pdf>
- Aguado, R., Casteleiro-Roca, J. L., Jove, E., Zayas-Gato, F., Quintián, H., & Calvo-Rolle, J. L. (2021). Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica.
- Arroyo, F., & Miguel, L. (2019). Análisis de la variación de las emisiones de CO₂ y posibles escenarios al 2030 en Ecuador.
- Asensio, P. (2007). Hidrógeno y pila de combustible. Obtenido de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-paratodos-hidrogeno-y-pila-de-combustible>.
- Bakhtiari, A. S. (2004). World oil production capacity model suggests output peak by 2006-07. *Oil and Gas Journal*, 102(16), 18-19
- Bielsa Hernández, A. (2017). Caracterización y adquisición del comportamiento de una celda de combustible para la valoración de la eficiencia energética en un motor eléctrico a escala (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Bolaños, C. (2005). Energética del hidrógeno contexto, estado actual, perspectivas de futuro (Magister en energética y mecánica de fluidos). Universidad de Sevilla.
- Datosmacro.(2020). Ecuador disminuir sus emisiones de CO₂. Recuperado de <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/ecuador>
- de Eficiencia Energética, I. I. (2015). Bases Esenciales para el Establecimiento de Políticas. *París: International Energy Agency*.

- Delgado, J., Aznar, M. P., & Corella, J. (1997). Biomass gasification with steam in fluidized bed: effectiveness of CaO, MgO, and CaO– MgO for hot raw gas cleaning. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(5), 1535-1543.
- Duque Cabrera, E. J., & Masaquiza, J. P. (2013). Implementación de un generador e inyector de hidrógeno en un motor de vehículo Mazda BT-50 2.2 L, para reducir emisiones de gases contaminantes (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Engineering ToolBox, (2003). Fuels - Higher and Lower Calorific Values. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.htm
- Fernández, S. S., & Jusmet, J. R. (2010). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO₂: Algunos posibles escenarios futuros de emisiones. *Revista Galega de Economía*, 19(1), 1-19.
- García-Conde, A. G. (2010). Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. Repositorio Digital de Universitat de Girona
- Hanwei electronics. (2014). TECHNICAL DATA MQ-8 GAS SENSOR Recuperado de: https://www.mouser.com/datasheet/2/830/MQ_8-1951103.pdf
- Hurtado, J. I. L., & Soria, B. Y. M. (2007). El hidrógeno y la energía. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- Hydrogen storage methods - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Primitive-phase-diagram-for-hydrogen-Liquid-hydrogen-only-exists-between-the-solid-line_fig1_8618603 [accessed 19 May, 2022]
- IEA (2021), Global Hydrogen Review 2021, IEA, Paris. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>

- Ji, C., & Wang, S. (2009a). Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(18), 7823–7834. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.06.082
- Ji, C., & Wang, S. (2009b). Effect of hydrogen addition on the idle performance of a spark ignited gasoline engine at stoichiometric condition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8), 3546–3556. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.02.052
- Ji, C., & Wang, S. (2016). Effect of hydrogen addition on the idle performance of a spark ignited gasoline engine at stoichiometric condition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8), 3546–3556. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.02.052
- Jodra, L. G. (2005). El hidrógeno, combustible del futuro. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 99(1), 49-68.
- Morante, J. R., Andreu, T., García, G., Guilera, J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada. Fundación Naturgy, Madrid, España.
- Organización Mundial de la Salud. (2021). Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire. Recuperado 28 de marzo de 2022, de <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- Pacheco, M. (7 de enero 2020). 1 258 millones de galones de gasolinas consumió el sector automotor en el 2019. *EL COMERCIO*. Recuperado de <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/petroecuador-gasolinas-consumo-ecuador-automotor.html>

- Pesantez Morocho, J. N., & Tacuri Morocho, J. V. (2020). Adaptación de un generador de tipo celda seca en un motor endotérmico 1500cc de 4 tiempos como fuente alternativa de combustible. (Bachelor's thesis, Universidad Politécnica Salesiana).
- Piqué, J. L. (2010). El hidrógeno y nuestro futuro energético. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Progress in Micro Joule-Thomson Cooling at Twente University - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/On-the-left-side-a-schematic-scheme-of-the-Linde-Hampson-cycle-On-the-right-side-the_fig2_48340443 [accessed 19 May, 2022]
- Quezada Romero, E. M., & Torres Gualan, D. F. (2014). Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo Chevrolet Steem 1.6 L (Bachelor's thesis).
- República del Ecuador (2019). “Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional para el Acuerdo de París bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático”. Recuperado de: <https://bit.ly/3pCurxc>.
- Sastresa, E. M. L., & Bribián, I. Z. (2011). *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos*. Universidad de Zaragoza
- Soloelectronicos .(2019). Controlando placas de IoT desde JavaScript. Recuperado de: <https://soloelectronicos.com/2019/04/10/controlando-placas-de-iot-desde-javascript/>
- Ulises, C.(1999). Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiencia vía electroquímica. Boletín IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas).
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Cryogenic Technology - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: <https://www.researchgate.net/figure/Linde-Hampson->

liquefaction-system-A-A-Schematic-a-Compressor-b-Heat-exchanger-c_fig2_301294539

[accessed 19 May 2022]

Bibliografía

- Aguado, R., Casteleiro-Roca, J. L., Jove, E., Zayas-Gato, F., Quintián, H., & Calvo-Rolle, J. L. (2021). Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica.
- Bellon Monsalve, D. (2017). Almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos: Síntesis y caracterización.
- Bolaños, C. (2005). Energética del hidrógeno contexto, estado actual, perspectivas de futuro (Magister en energética y mecánica de fluidos). Universidad de Sevilla.
- Castro Páez, C. E. (2004). Producción y almacenamiento de hidrógeno.
- Cruz Reina, O., & Jiménez Ferreiro, D. (2010). Efecto de los tratamientos térmicos en la circona utilizada como electrolito en las pilas de combustible de óxido sólido.
- Delgado, J.; Corella, J.; Aznar, M,P, Biomass Gasification with Steam in Fluidized Bed: Effectiveness of CaO, MgO and (2aO-MgO for Hot Raw Gas Cleaning. md. Eng Chem. Res., 1997,36(5), in press (galley proofs checked and returned to the Editor).
- Guerrero Jijón, W. S., & Pesantes Pacheco, M. A. (2019). Optimización de la producción de energía de una celda tipo PEM (Bachelor's thesis).
- Hurtado, J. I. L., & Soria, B. Y. M. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- Libro --Hortal, M. A., & Barrera, A. L. M. (2012). El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado. Ediciones Díaz de Santos.
- Mahecha Rodríguez, E. A. (2018). Uso del hidrógeno como fuente alternativa para alimentar pilas de combustible (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Murphy, D. J., & Hall, C. A. (2010). Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(1), 102-118.

Redonda III, M., & de Hidrógeno, A. HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE: ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVA INMEDIATA.

Robelius, F. (2007). Giant oil fields-the highway to oil: Giant oil fields and their importance for future oil production (Doctoral dissertation, Acta Universitatis Upsaliensis).

Ruiz Gómez, J. (2010, September). Diseño y fabricación de una pila de combustible de hidrógeno de baja potencia (Projecte/Treball Final de Carrera). UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa, Departament d'Enginyeria Mecànica. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099.1/10544>

Singla, M. K., Nijhawan, P., & Oberoi, A. S. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(13), 15607-15626.

Sosa, F. V. (2019). Análisis de la evolución de los subsidios a derivados del petróleo en Ecuador. *Boletín Estadístico del sector de Hidrocarburos*, 16, 26-49. Sosa, F. V. (2019). Análisis de la evolución de los subsidios a derivados del petróleo en Ecuador. *Boletín Estadístico del sector de Hidrocarburos*, 16, 26-49.

Vicens Garcia, G. (2011). Vehículos de hidrógeno. Perspectivas de futuro.

ANEXOS

Anexo 1. Recolección de información

Prueba N°1 de generador de Hidrógeno							
Solución:	sal o cloruro de sodio	Voltaje de la batería (v)		12.56			
Num	Cat. de solución (kg)	Cat de electrolito (ml)	Voltaje de consumo generador (v)	Corriente (A)	Volumen (ml/min)	Temperatura del generador (°C)	Coloración
1	0,004	250	10,34	5,77-5,80	210	22	café claro
2	0,004	250	10,3	6,5-6,96	240	23	café oscuro
3	0,004	250	10,07	7-7,12	247	26	café oscuro
4	0,004	250	9,97	7,30-7,80	250	28	café oscuro y espeso
5	0,004	250	9,34	7,90-8.05	260	30	café oscuro y espeso
Total	0,02	250					
Comentario							
En las primeras pruebas el poco volumen de hidrógeno que se obtiene si es explosivo, además cada vez que se aumentaba la solución se oscurecía más el electrolito ; se al final se obtuvo una solución en forma de colada y poco explosiva							

Prueba N°2 de generador de Hidrógeno							
Solución:	bicarbonato de sodio	Voltaje de la batería (v)		12.56			
Num	Cat. de solución (kg)	Cat de electrolito (ml)	Voltaje de consumo generador (v)	Corriente (A)	Volumen (ml/min)	Temperatura del generador (°C)	Coloración
1	0,004	250	11,7	2,05-2,10	0	18	café claro
2	0,004	250	11,27	2,44-2,75	100	20	café claro
3	0,004	250	10,89	2,99-3,15	120	23	café claro
4	0,004	250	10,96	3,40-3,12	130	24	café claro
5	0,004	250	11,1	3,60-3,46	145	25	café claro
Total	0,02	250					
Comentario							
En las primeras pruebas de explosión del gas no fue muy eficiente; al proseguir con las pruebas se obtuvieron mejores resultados							

Anexo 2. Data sheet sensor MQ-8

HANWEI ELETRONICS CO.,LTD

MQ-8

<http://www.hwsensor.com>

TECHNICAL DATA

MQ-8 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to Hydrogen (H₂)
- * Small sensitivity to alcohol, LPG,cooking fumes
- * Stable and long life

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of Hydrogen (H₂), avoid the noise of alcohol and cooking fumes, LPG,CO.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
P _L	Load resistance	10K Ω	
R _H	Heater resistance	31 ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mW	

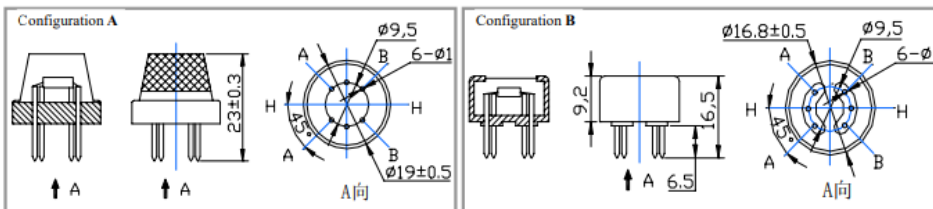
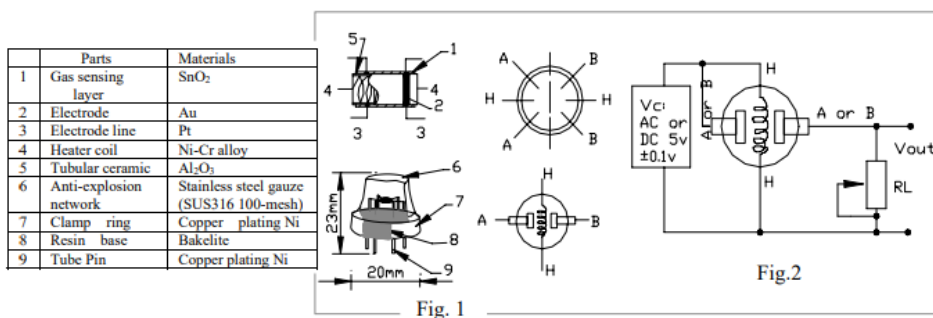
B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T _{ao}	Using Tem	-10°C -50°C	
T _{as}	Storage Tem	-20°C -70°C	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
R _s	Sensing Resistance	10K Ω - 60K Ω (1000ppm H ₂)	Detecting concentration scope: 100-10000ppm Hydrogen (H ₂)
α (1000ppm/ 500ppmH ₂)	Concentration slope rate	≤0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20°C ± 2°C Humidity: 65% ± 5%	V _c : 5V ± 0.1 V _H : 5V ± 0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit



TEL: 86-371- 67169070 67169080 FAX: 86-371-67169090

E-mail: sales@hwsensor.com

Structure and configuration of MQ-8 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al_2O_3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-8 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

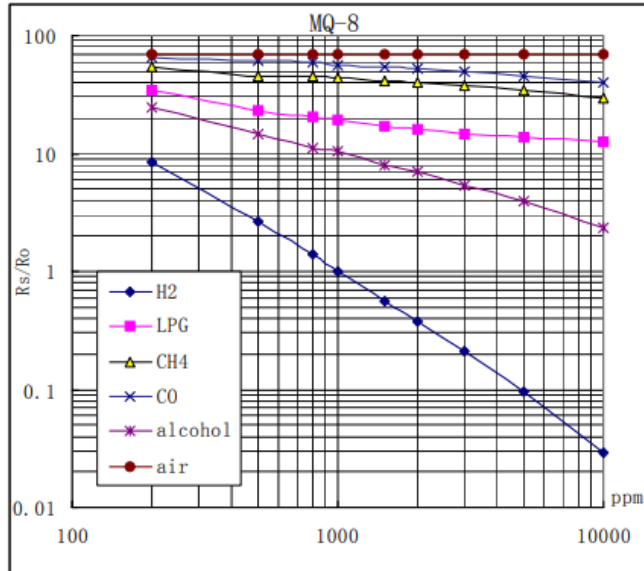


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-8

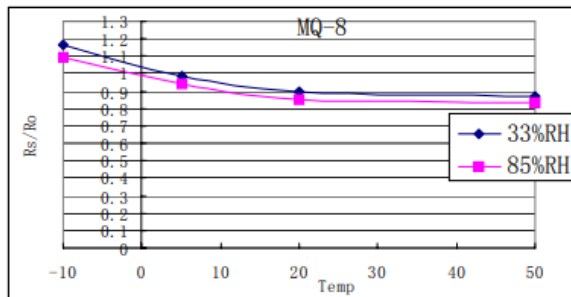


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-8 on temperature and humidity.
 R_o : sensor resistance at 1000ppm of H_2 in air at 33%RH and 20 degree.
 R_s : sensor resistance at 1000ppm of H_2 in air at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-8 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 1000ppm H_2 concentration in air and use value of Load resistance (R_L) about 10 K Ω (5K Ω to 33 K Ω).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

Anexo 3. Programación en Arduino

```
#define MQ_PIN (4) //entrada analogica
#define RL_VALUE (10) //definir el valor Rl
#define RO_CLEAN_AIR_FACTOR (9.21) //establecer valor inicial de la resistencia
                                     Ro en aire limpio

/*****datos para la calibracion*****/
#define CALIBARAION_SAMPLE_TIMES (50)
#define CALIBRATION_SAMPLE_INTERVAL (500)

/*****tiempos para la calibracion*****/

#define READ_SAMPLE_INTERVAL (50)
#define READ_SAMPLE_TIMES (5)

/*****Application Related Macros*****/
#define GAS_H2 (0) //nivel de hidrogeno inicial

/*****curva de analisis*****/
float H2Curve[3] = {2.3, 0.93,-1.44}; //puntos altos, bajos y medios obtenidos por
                                     la curva de la ecuacion de ppm

float Ro = 10; //resistencia inicial del sensor

/*****datos para sensor de temperatura *****/

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

OneWire ourWire(2); //Se establece el pin 2 como bus OneWire

DallasTemperature sensors(&ourWire); //Se declara una variable u objeto para
                                     nuestro sensor

void setup()
{
  delay(1000);
  Serial.begin(9600); //setup, baudrate = 9600bps
  sensors.begin(); //Se inicia el sensor de temperatura
}

void loop()
{
  sensors.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp= sensors.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C

  Serial.print(MQGetGasPercentage(MQRead(MQ_PIN)/Ro,GAS_H2) );
  Serial.print( "_" );

  Serial.println(temp);

  delay(100);
}

/***** calculo de la resistencia del sensor MQ-8 *****/
corriente de entrada: raw_adc
corriente de salida: valor a calcular

/*****/
float MQResistanceCalculation(int raw_adc)
{
  return ( ((float)RL_VALUE*(1023-raw_adc)/raw_adc));
}
```

```

/***** calibracion del sensor *****/
entrada de valor:  mq_pin - tipo analogica
Salida: Resistencia Ro del sensor

*****/
float MQCalibration(int mq_pin)
{
  int i;
  float val=0;

  for (i=0;i<CALIBARAION_SAMPLE_TIMES;i++) {          //registra diferentes muestras
    val += MQResistanceCalculation(analogRead(mq_pin));
    delay(CALIBRATION_SAMPLE_INTERVAL);
  }
  val = val/CALIBARAION_SAMPLE_TIMES;

  val = val/RO_CLEAN_AIR_FACTOR;

  return val;
}
/***** lectura del sensor MQ-8 *****/
entrada de valor:  mq_pin - tipo analogica
Salida: Resistencia Rs del sensor

*****/
float MQRead(int mq_pin)
{
  int i;
  float rs=0;

  for (i=0;i<READ_SAMPLE_TIMES;i++) {
    rs += MQResistanceCalculation(analogRead(mq_pin));
    delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
  }

  rs = rs/READ_SAMPLE_TIMES;

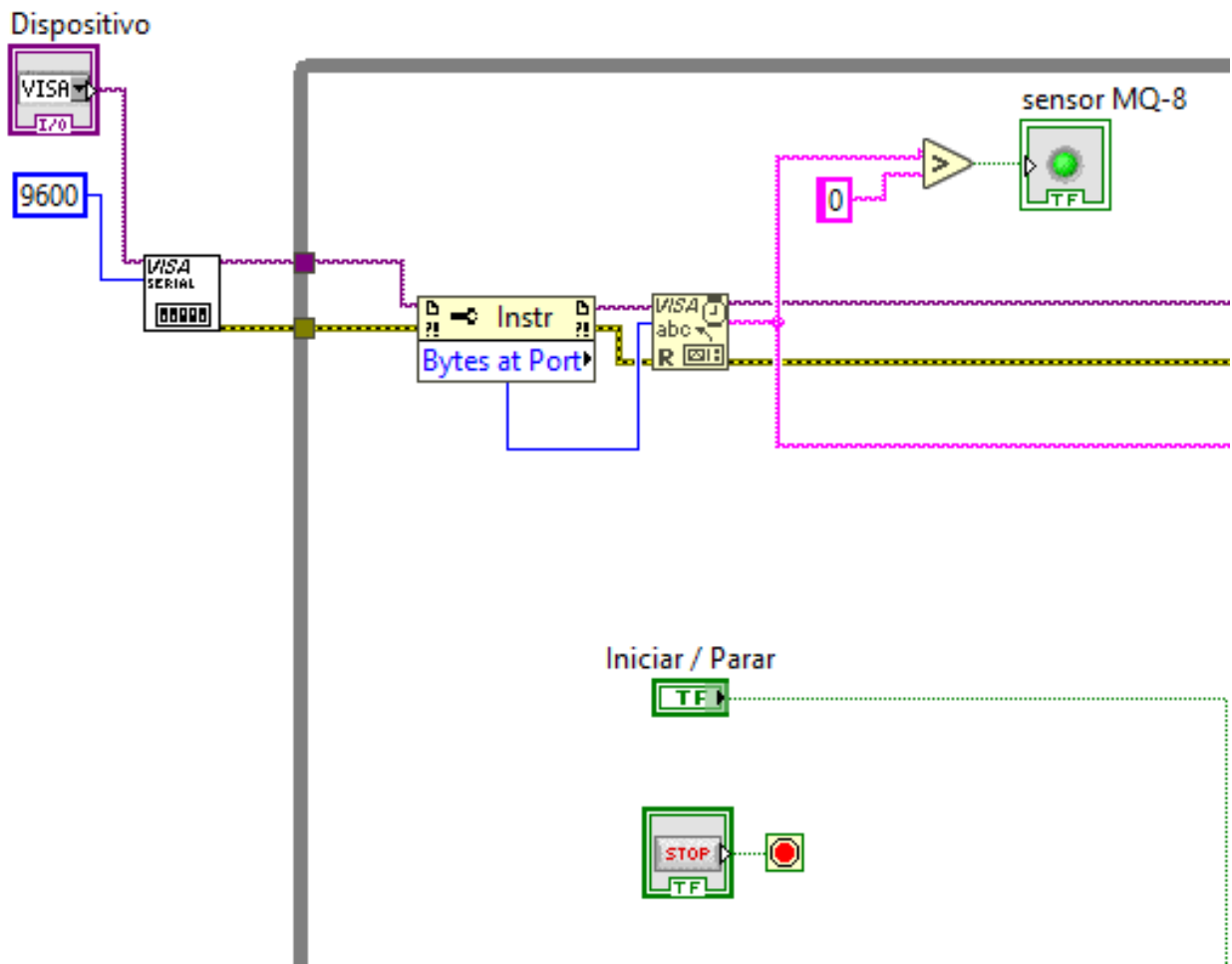
  return rs;
}

/***** medicion de gas de hidrogeno *****/
obtener las particulas por millon de hidrogeno
*****/
int MQGetGasPercentage(float rs_ro_ratio, int gas_id)
{
  if ( gas_id == GAS_H2) {
    return MQGetPercentage(rs_ro_ratio,H2Curve);
  }
  return 0;
}

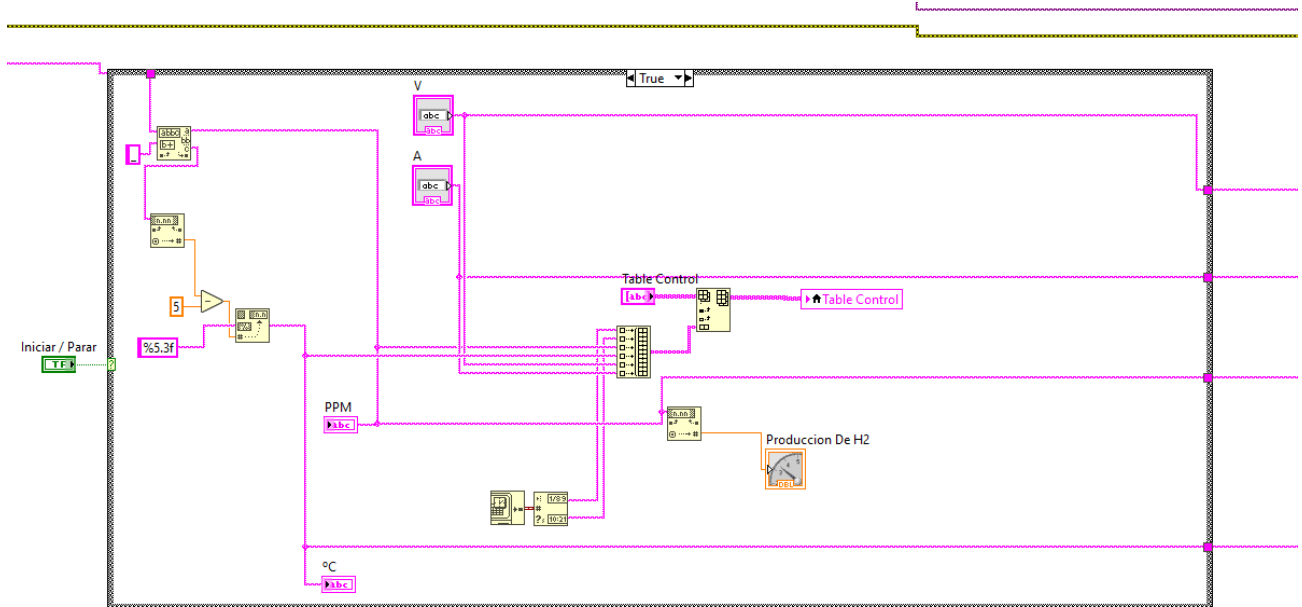
/***** medicion de gas de hidrogeno *****/
obtener las particulas por millon de hidrogeno
*****/
int MQGetPercentage(float rs_ro_ratio, float *pcurve)
{
  return (pow(10,((log(rs_ro_ratio)-pcurve[1])/pcurve[2]) + pcurve[0]]));
}
...

```

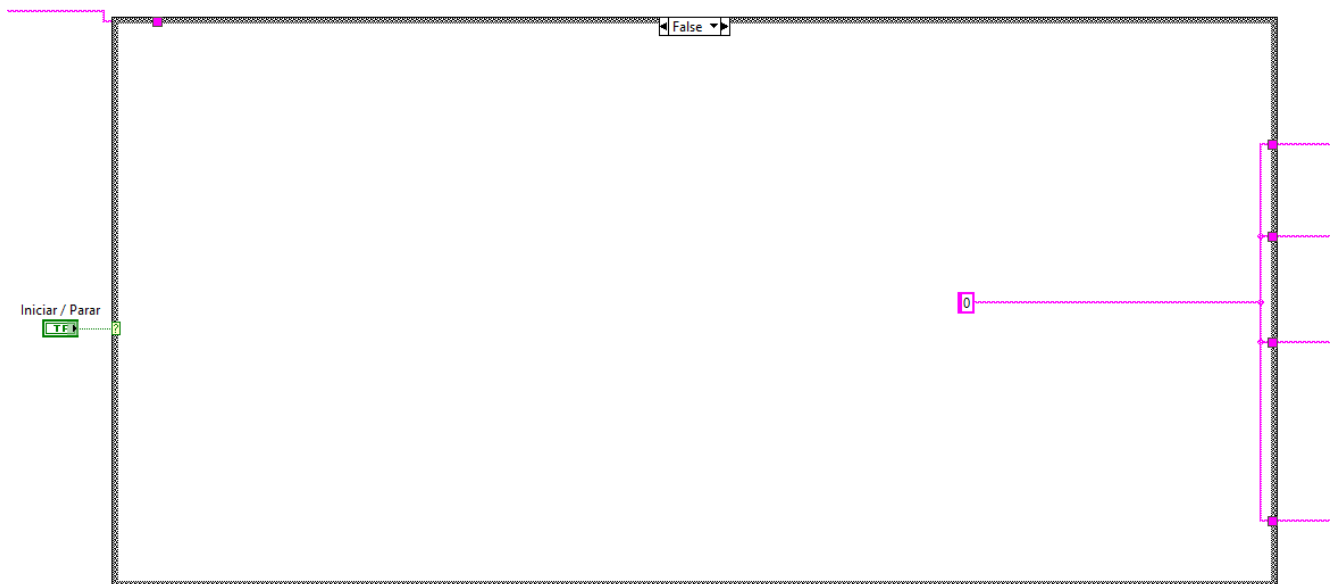
Anexo 4. Estructura de programación de zona A



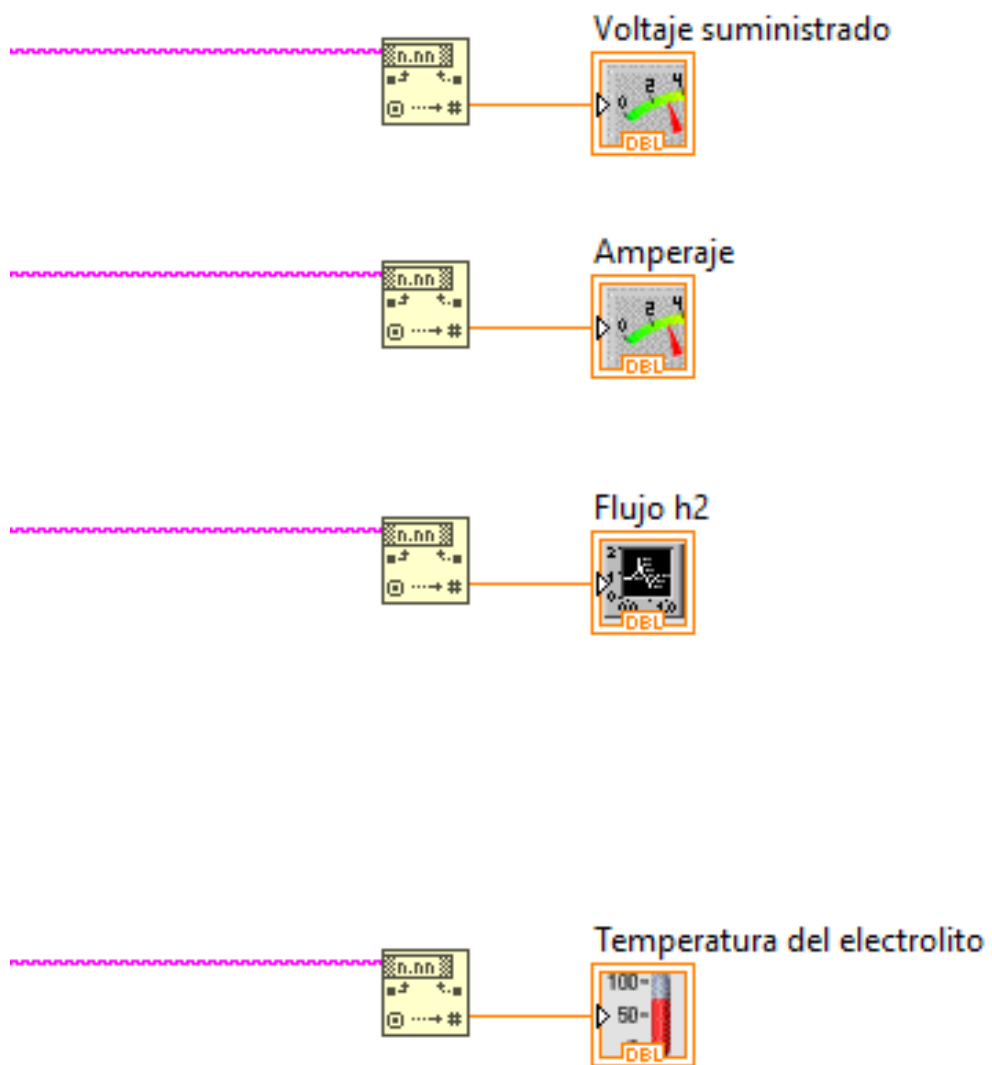
Anexo 5. Estructura de programación del software iniciando operación



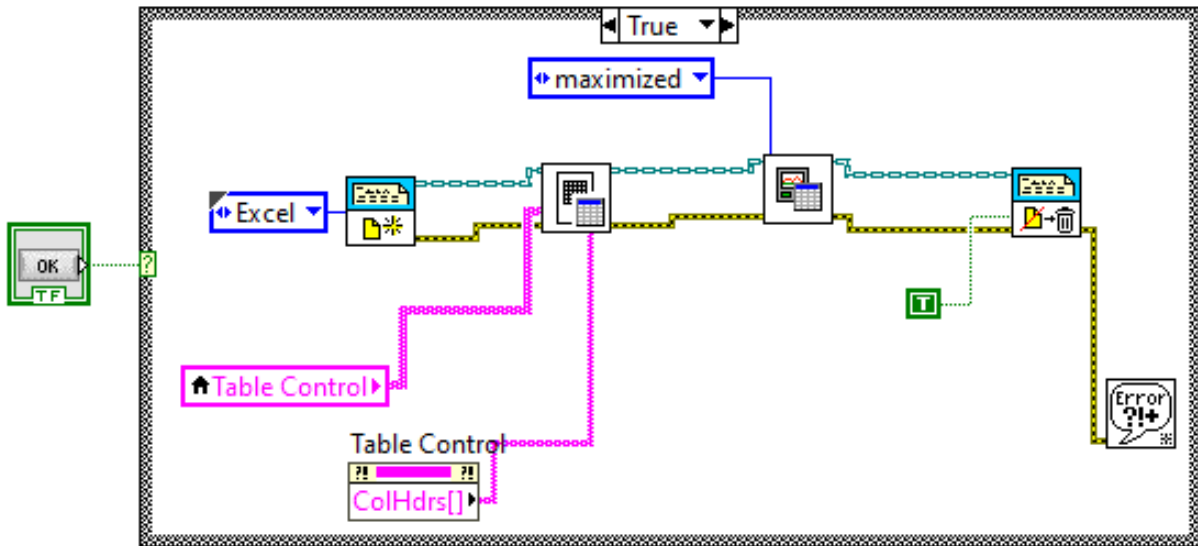
Anexo 6. Estructura de programación del software parado



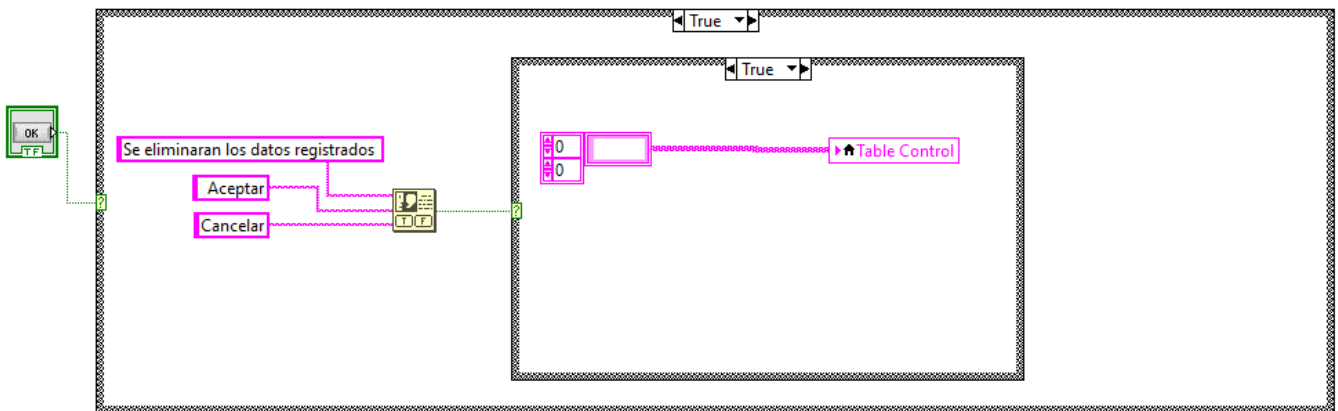
Anexo 7. Estructura de programación de los indicadores de medidas



Anexo 8. Estructura de programación de exportación de datos a Excel



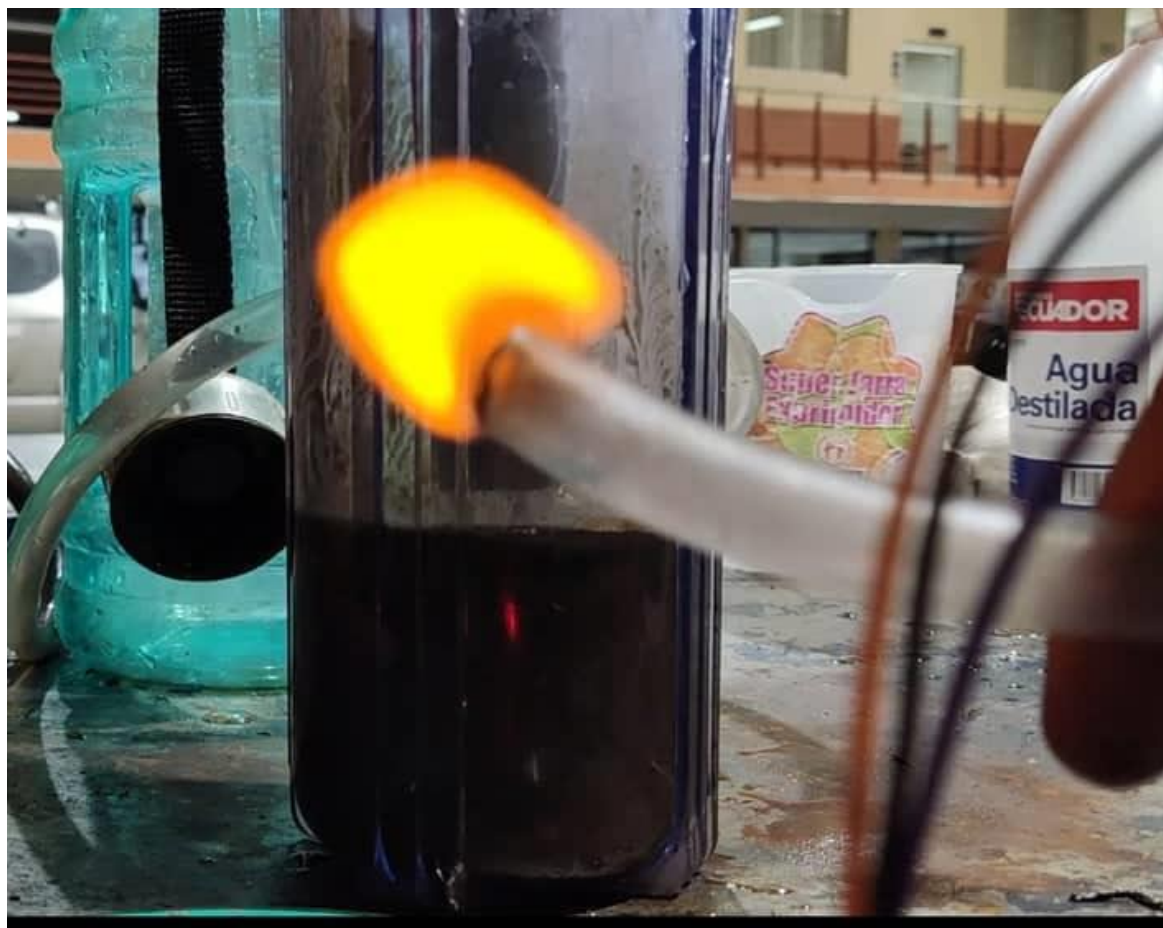
Anexo 9. Estructura de programación de limpieza/borrado de datos registrados



Anexo 10. Preparación del electrolito



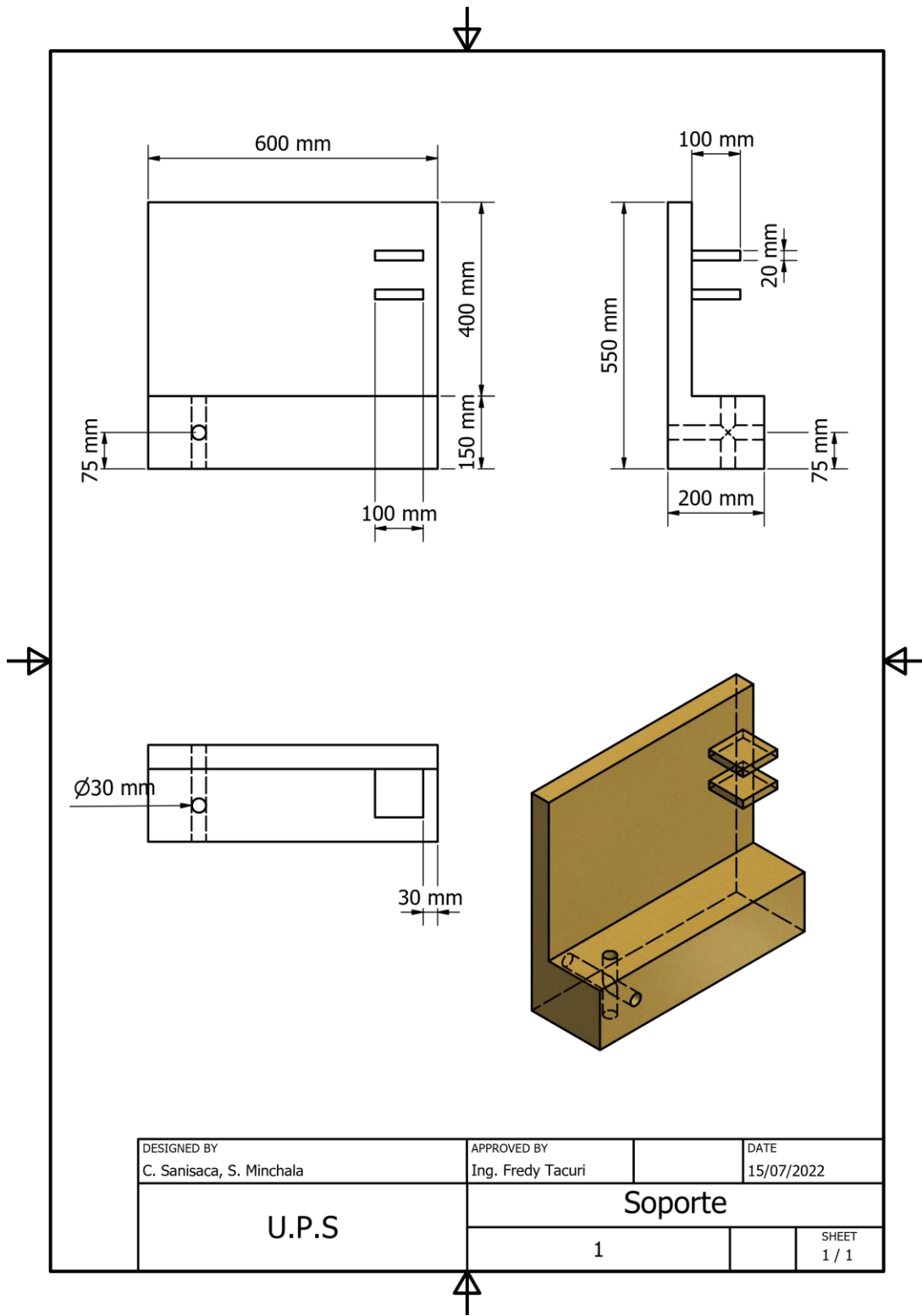
Anexo 11. Combustión en la manguera de salida del hidrógeno



Anexo 12. Quema de minerales durante las pruebas



Anexo 13. Plano de la estructura del generador de hidrógeno



Anexo 14. Muestra de datos obtenidos de la corrida experimental

	Fecha	Hora	PPM	Voltaje	Amperaje	Tiempo
197	07/06/2022	12:50:00 PM	1394	12	12	197
198	07/06/2022	12:50:00 PM	1820	12	12	198
199	07/06/2022	12:50:00 PM	1347	12	12	199
200	07/06/2022	12:50:00 PM	1729	12	12	200
201	07/06/2022	12:50:00 PM	4814	12	12	201
202	07/06/2022	12:50:00 PM	5983	12	12	202
203	07/06/2022	12:50:00 PM	7509	12	12	203
204	07/06/2022	12:50:00 PM	11124	12	12	204
205	07/06/2022	12:50:00 PM	5578	12	12	205
206	07/06/2022	12:50:00 PM	2234	12	12	206
207	07/06/2022	12:50:00 PM	7670	12	12	207
208	07/06/2022	12:50:00 PM	2319	12	12	208
209	07/06/2022	12:50:00 PM	1324	12	12	209
210	07/06/2022	12:50:00 PM	5698	12	12	210
211	07/06/2022	12:50:00 PM	13541	12	12	211
212	07/06/2022	12:50:00 PM	7998	12	12	212
213	07/06/2022	12:50:00 PM	8137	12	12	213
214	07/06/2022	12:50:00 PM	2801	12	12	214
215	07/06/2022	12:50:00 PM	20776	12	12	215
216	07/06/2022	12:50:00 PM	21467	12	12	216