



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN LA CELDA TIPO SECA
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DIFERENTES ELECTROLITOS VERIFICANDO SU
FUNCIONALIDAD

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

AUTOR: LUIS ALFREDO ORTIZ GONZÁLEZ

TUTOR: ING. FREDY GONZALO TACURI MOSCOSO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

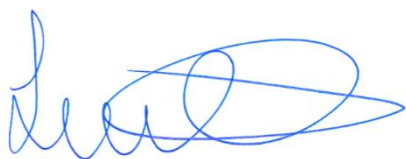
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Alfredo Ortiz González con documento de identificación N° 0302625207, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo 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, 30 de enero del 2024

Atentamente,



Luis Alfredo Ortiz González

0302625207

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

Yo, Luis Alfredo Ortiz González con documento de identificación N° 0302625207, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo académico: “Evaluación de la generación de hidrógeno en la celda tipo seca mediante la utilización de diferentes electrolitos verificando su funcionalidad”, 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, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 30 de enero del 2024

Atentamente,



Luis Alfredo Ortiz González

0302625207

EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN LA CELDA TIPO SECA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DIFERENTES ELECTROLITOS VERIFICANDO SU FUNCIONALIDAD

EVALUATION OF THE LEVEL OF HYDROGEN GENERATION IN THE DRY TYPE CELL WITH DIFFERENT TYPES OF ELECTROLYTE

Luis Ortiz¹, Fredy Tacuri²

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la generación de hidrógeno en una celda tipo seca mediante la utilización de diferentes electrolitos. La investigación emplea un diseño experimental factorial, teniendo un factor A con tres tipos de electrolitos (cloruro de sodio, ácido cítrico y sulfato de cobre) y un factor B con 10 diferentes concentraciones (rango = 10 - 28 g). Consecuentemente, se puso a prueba los tres tipos de electrolitos para producir electrólisis hasta generar hidrógeno. La producción fue evaluada por un sensor de H₂ en ppm, para finalmente almacenar los datos en un ordenador. Los datos obtenidos revelan que la combinación de agua destilada con 28g de cloruro de sodio es la más propicia para la generación de hidrógeno.

Palabras Clave: electrolito, generación de hidrógeno, celda seca, diseño de experimentos factorial, ppm de hidrógeno, electrólisis.

Abstract

This research aims to evaluate the generation of hydrogen in a dry type cell through the use of different electrolytes. The research uses a factorial experimental design, having a factor A with three types of electrolytes (sodium chloride, citric acid and copper sulfate) and a factor B with 10 different concentrations (range = 10 - 28 g). Consequently, the three types of electrolytes were tested to produce electrolysis until generating hydrogen. The production was evaluated by an H₂ sensor in ppm, to finally store the data in a computer. The data obtained reveal that the combination of distilled water with 28g of sodium chloride is the most conducive to the generation of hydrogen.

Keywords: electrolyte, hydrogen generation, dry cell, factorial design of experiments, ppm hydrogen, electrolysis.

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: lortizg1@est.ups.edu.ec

² Máster en Sistemas Automotrices, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: ftacuri@ups.edu.ec

1. Introducción

En Ecuador según el Balance Energético Nacional de 2022 [1], el transporte representó el 49,8% del total de emisiones de gases de efecto invernadero -GEI- del sector energético, especialmente si se consideran las cifras publicadas por la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador -AEADE- [2], donde hasta agosto de 2023 Ecuador contaba con cerca de 2900000 vehículos, donde 2500000 unidades corresponden a vehículos livianos y 368000 son vehículos comerciales. En adición, desde 2021 los vehículos ambientalmente amigables han sido comercializados en torno a 16000 unidades: tipo híbrido (HEV), híbrido enchufable (PHEV), eléctricos semi híbridos (MHEV) y eléctricos de baterías (BEV).

Como lo demuestran los datos, existe una prevalencia de vehículos con motores de combustión interna que generan emisiones contaminantes y dependencia de combustibles fósiles, especialmente si se contempla que al año 2022 el 78% del diésel fue destinado al transporte, mientras el 95,6% del total de gasolina correspondió a este sector [2]. Además, en el país persiste la mala calidad de los combustibles al regir normativa antigua como Euro 1 y Euro 2 [3].

Consecuentemente, varios análisis a escala global buscan incorporar fuentes de propulsión ambientalmente amigables en vehículos, siendo el hidrógeno una de las principales alternativas en conjunto con la energía eléctrica [4]. A pesar de esto, se debe considerar que en ciertos casos los costos de adquisición de un vehículo de hidrógeno pueden ser elevados, siendo necesario implementar de manera paulatina sistemas de transporte como taxis, sistemas de uso compartido de vehículos y autobuses de hidrógeno [5].

Además, se busca que el hidrógeno sea un aditivo en los sistemas de combustible de hidrocarburos para producir un mayor rendimiento en los motores de combustión interna únicamente alimentados por gasolina [6]. Es decir, se desea implementar estrategias de combustible dual para aumentar la estabilidad de la combustión y la eficiencia térmica, a la vez reducir las emisiones de CO, hidrocarburos no quemados y el consumo de

combustible. Esto se consigue mediante la introducción de una mezcla de hidrógeno y gasolina en el motor, donde la mezcla comprimida se enciende mediante una chispa, especialmente porque el alto calor específico del hidrógeno hace que este elemento logre una combustión estable en relaciones de equivalencia muy pobres (0:2 partes de hidrógeno vs gasolina) [6].

Por este motivo, se encuentran algunos tipos como los vehículos de pila de combustible propulsados por hidrógeno gaseoso, vehículos con motor de combustión interna de encendido por chispa y vehículos propulsados por hidrógeno líquido [7].

Lo antes indicado se relaciona con el cambio de paradigma en el sector transporte causado por el cambio climático, en donde los vehículos eléctricos eran el principal punto de consideración, aunque no podrían representar una alternativa eficaz dado el potencial de emisiones dependiente de la manera en que se produce la electricidad [8].

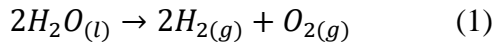
Es así como en este estudio se elaboran diferentes electrolitos con insumos accesibles comercialmente, tales como: agua destilada, sulfato de cobre, ácido cítrico y cloruro de sodio.

1.1. Estado del arte

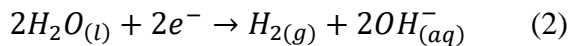
La electrólisis es un proceso electroquímico mediante el cual se descompone un compuesto químico en sus elementos constituyentes o se sintetiza una nueva molécula, a través de la aplicación de una corriente eléctrica [9]. La reacción global del proceso se describe en la ecuación (1). Este fenómeno puede ocurrir en medios ácidos, básicos o salinos. En el electrodo negativo (cátodo), tiene lugar una reacción de reducción, durante la cual los electrones (e^-) son capturados por los cationes H^+ para formar hidrógeno diatómico (H_2 (g)), conforme se ilustra en la ecuación (2). En contraste, en el electrodo positivo (ánodo), se lleva a cabo una reacción de oxidación, en la que la molécula de H_2O se oxida, perdiendo electrones (e^-), lo que resulta en la formación de oxígeno diatómico (O_2 (g)) y la liberación de cationes H^+ , tal como se detalla en la ecuación (3) [10].

Las reacciones que se producen en la electrólisis son las siguientes [11-12]:

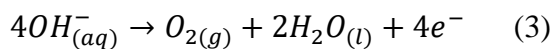
Reacción general:



Reacción de reducción en el cátodo:



Reacción de oxidación en el ánodo:



El hidrógeno en los motores de combustión interna tiene muchas ventajas en términos de propiedades de combustión [13]. Por tal motivo, en numerosos estudios se puede encontrar la evaluación de generación de hidrógeno, empleando ciertos compuestos de electrolito.

Por ejemplo, Guiracocha y Banegas [14] emplearon hidróxido de sodio y agua destilada, quienes concluyen que el electrolito más propicio para una mayor producción de hidrógeno en partes por millón (ppm), es usando 1 g de hidróxido de sodio en 500 ml de agua destilada. Asimismo, Cabanillas [15] propone el uso de hidrógeno como elemento para mejorar la mezcla en un motor de combustión interna. Para tal efecto, el autor obtiene hidrógeno al dividir las partículas de agua mediante electrólisis, en adición con hidróxido de potasio (KOH). Consecuentemente, se obtuvo una disminución de 23,44% en el consumo de combustible.

Con la misma importancia, Pesántez y Tacuri [16] adaptaron un generador de hidrógeno tipo celda seca en un motor endotérmico de motocicleta (150 cm³). Además, construyeron un generador de hidrógeno tipo celda seca, usando dos placas de acrílico o tapas en los extremos (e=4mm), en cuyo interior se encuentran placas de acero inoxidable separadas por empaque de goma (3mm-7mm), cumpliendo la función de electrodos. Los electrodos son de acero inoxidable 304. Los autores concluyen que la producción de hidrógeno es proporcional a la superficie de las placas y a la

intensidad de corriente, siendo importante la cantidad de electrolito usado (5%), puesto que se puede aumentar o disminuir la corriente en el generador (< 10A). Con la misma importancia, los autores concluyen que el dióxido de carbono presenta un incremento de 2,5% a 1500 rpm y el monóxido de carbono disminuye considerablemente, lo cual indica una combustión más eficiente.

Mientras tanto, Aimacaña y Masapanta [17] implementaron un sistema generador de hidrógeno en un motor de combustión interna (1 800 cm³), usando un reactor que consume 4,55A a 13,91 V en CC. De esta manera, se añadió combustible extra y HHO al sistema de admisión, incrementando la potencia en 6,6 hp a 5 400 rpm. Asimismo, al inyectar combustible super y HHO al sistema, se obtuvo un incremento en la potencia de 4,2 hp a 5 486 rpm.

Una consideración durante la operación del generador es la corriente aplicada, tal como lo indica Puican [18], al recomendar no sobrepasar 8A, puesto que se podría generar vapor y una aparente reducción de la eficiencia; todo esto al realizar el experimento en un motor de 200 cm³.

Por otro lado, en los sistemas de generación de hidrógeno se requiere de un sistema de inyección de alta presión, donde los niveles mínimos de presión son casi el doble en comparación con los niveles máximos requeridos en los motores de encendido por chispa (600 bar). Con el amplio rango de inflamabilidad del hidrógeno, es posible que el motor funcione con una relación aire-combustible muy baja [19].

Por otro lado, Herdoiza [20] empleó electrolizadores tipo PEM (celda de combustible de membrana de intercambio de protones) por su configuración y según detalla, por ser de fácil construcción. Así, aplicó un método de cuantificación de hidrógeno numérico y otro por diferencias volumétricas. El autor da a conocer que las variables más importantes para generar hidrógeno son el voltaje, la corriente y la temperatura.

Asimismo, Cruz [21] da a conocer electrolizadores alcalinos y otros de óxido de sodio. Los primeros emplean NaOH y KOH y tienen

como ventajas una mayor producción de hidrógeno, mientras los segundos son cerámicos y se encuentran en desarrollo. Por ello, [20] expone que los primeros compuestos brindan propiedades de conducción eléctrica al agua destilada, así como influyen dos principios eléctricos o leyes de Faraday.

En otro sentido, De Souza et al. [22] implementaron un generador de hidrógeno elaborado a partir de placas de acero inoxidable con capacidad de 316 L, de 110 x 110 (mm), con acceso a dos orificios en el medio que estarán disponibles para agua y gas con un diámetro de 2 (mm).

Asimismo, en la Figura 1 se muestra la parte externa del conjunto, donde internamente aparece un sistema de ignición de dos válvulas y una bujía, siendo una válvula abierta para la inyección de combustible y la otra para la entrada de oxígeno. La entrada de oxígeno es admitida por la Inyección del Cuerpo del Acelerador (TBI), donde también se realiza una medida de pureza del aire a través de un sensor de partículas para que la dosificación de gasolina sea la adecuada para la mezcla.



Figura 1. Generador de hidrógeno instalado. [21]

Tamayo et al. [23] analizaron los parámetros del funcionamiento real de un motor de combustión interna ciclo Otto alimentado por hidrógeno. Los autores determinaron dos ecuaciones estequiométricas, siendo la primera basada en los reactivos octano y aire, mientras la segunda adicionó 3,86 moles de hidrógeno provenientes de una celda de hidrógeno. Usando un motor monocilíndrico se obtuvo una potencia real de 3,78 hp sin usar hidrógeno, mientras la potencia con hidrógeno fue de 4,66 hp (incremento de 16,7%).

Consecuentemente, si se compara la eficiencia del motor de hidrógeno con los motores de combustión interna, se evidencia que estos últimos alcanzan su punto de máxima eficiencia cuando se acercan a su máxima potencia, mientras las pilas de hidrógeno tienen mayor rendimiento a cargas parciales (Figura 2), donde se expone una gráfica de potencia (% del máximo) en comparación con la eficiencia [23].

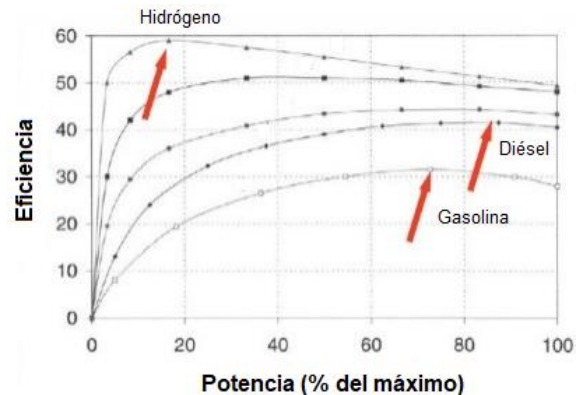


Figura 2. Comparativa entre diésel, gasolina e hidrógeno [23]

Mientras tanto, Quezada y Torres [24] desarrollaron un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo en circulación, empleando hidróxido de potasio como electrolito, y comparándolo con otros compuestos como bicarbonato de sodio, sal e hidróxido de sodio (para todos los casos se usa 0,004 kg), determinando que los mejores resultados se dan con los hidróxidos, al obtener temperaturas de explosión de 2 601, 43° K (2 370,43° K sólo con gasolina).

Finalmente, Sanisaca y Minchala [25] evaluaron la producción de hidrógeno de una celda tipo seca mediante la adquisición de datos, empleando sensores de tipo industrial (sensores de gas MQ-2 y MQ-8). El electrolito usado es cloruro de sodio o sal común (NaCl), enfatizando que el uso de hidróxidos está limitado para su uso comercial. Asimismo, los autores exponen que a carga lenta el diseño experimental usado provee una mejor producción de hidrógeno (5374 ppm), mientras para cargas rápidas hace que el electrolito sea degradado a mayor velocidad (874 ppm).

2. Materiales y Métodos

La presente sección detalla los materiales empleados para el desarrollo de la investigación, así como la metodología requerida, con base en tres fases, tal como se detalla en la Figura 4.

2.1. Materiales

Los instrumentos empleados en este estudio constan a continuación, junto con las especificaciones técnicas detalladas en la Tabla 1:

- Generador de hidrógeno. Figura 3 (a), (b), (c) y (e).
- Balanza (Figura 5b).
- Computadora (Figura 3d)
- Batería 12V

Tabla 1. Características de los materiales utilizados

Denominación	Características
Generador de hidrógeno	Cuenta con: <ul style="list-style-type: none"> • Depósito de electrolito: Material PVC, capacidad 1L • Burbujeador: Material de polipropileno, capacidad 2L • Programa desarrollado en LabVIEW • Sensor H₂: Alimentación 5VDC, alta sensibilidad al H₂ • Celda tipo seca
Computadora	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema operativo Windows 10 • Procesador Intel Core i7 • Memoria RAM 16GB
Batería 12V	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión nominal 12V • Capacidad de reserva 100 min. • Libre de mantenimiento
Balanza	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad (g): 3100 • Legibilidad (g): 0.01 • Desviación de linealidad, típica (g): ± 0.006 • Desviación de linealidad: ± 0.02 • Estabilización: 1s

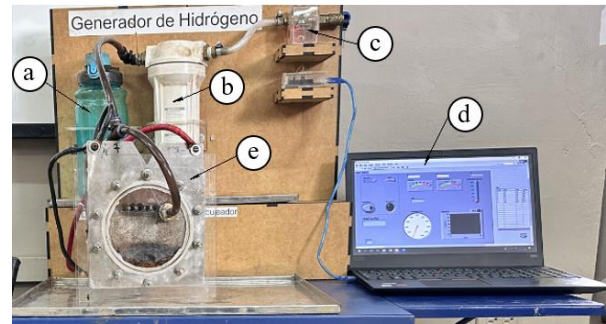


Figura 3. Generador de hidrógeno: Depósito de electrolito (a), burbujeador (b), sensor H₂ (c), computadora (d) y celda seca (e)

2.2. Metodología

En la investigación experimental fueron aplicadas las siguientes fases de estudio:

- Diseño de experimentos.
- Preparación de los electrolitos.
- Adquisición de datos.

2.2.1. Diseño de experimentos

El proceso requerido para definir los factores de influencia en las iteraciones experimentales se indica en la Figura 4.

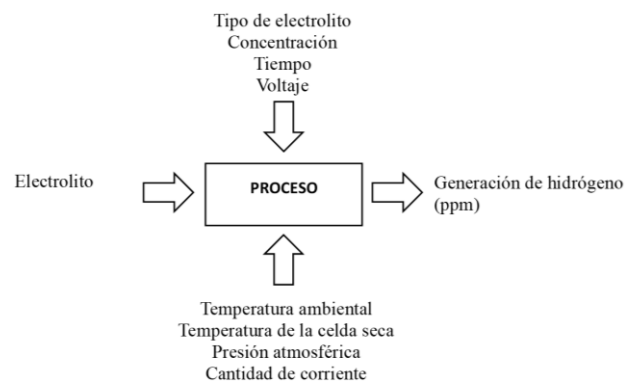


Figura 4. Diagrama del proceso empleado en la investigación. [26].

Para establecer las condiciones de las corridas experimentales se aplica un diseño de experimentos tipo factorial 3x10 utilizando el software Minitab 18, en el cual se analizan dos factores que son: factor A tipos de electrolitos (agua destilada + sulfato de Cu, agua destilada + Cloruro de sodio,

agua destilada + ácido cítrico) y el factor B corresponde al nivel de concentración en gramos de las sustancias solidas químicas para formular los electrolitos (sulfato de cobre, Cloruro de sodio, ácido cítrico), se establecieron 10 niveles variando en intervalos de 2 g, iniciando con 10 g hasta 28 g. En la tabla 2 se presenta el orden de las corridas experimentales generado por el diseño de experimentos.

Tabla 2. Diseño de experimental empleado

Orden Est.	Orden Corrida	Tipo Pt	Bloques	Electrolito	Concentración [g]
5	1	1	1	C. Sodio	18
13	2	1	1	A. Cítrico	14
14	3	1	1	A. Cítrico	16
10	4	1	1	C. Sodio	28
27	5	1	1	S. Cobre	22
17	6	1	1	A. Cítrico	22
19	7	1	1	A. Cítrico	26
9	8	1	1	C. Sodio	26
21	9	1	1	S. Cobre	10
12	10	1	1	A. Cítrico	12
2	11	1	1	C. Sodio	12
15	12	1	1	A. Cítrico	18
1	13	1	1	C. Sodio	10
25	14	1	1	S. Cobre	18
4	15	1	1	C. Sodio	16
30	16	1	1	S. Cobre	28
11	17	1	1	A. Cítrico	10
6	18	1	1	C. Sodio	20
8	19	1	1	C. Sodio	24
7	20	1	1	C. Sodio	22
3	21	1	1	C. Sodio	14
28	22	1	1	S. Cobre	24
26	23	1	1	S. Cobre	20
23	24	1	1	S. Cobre	14
20	25	1	1	A. Cítrico	28
29	26	1	1	S. Cobre	26
22	27	1	1	S. Cobre	12
18	28	1	1	A. Cítrico	24
16	29	1	1	A. Cítrico	20

24	30	1	1	S. Cobre	16
----	----	---	---	----------	----

2.2.2. Preparación de los electrolitos

De acuerdo con el diseño de experimentos y definido el orden de iteración, se elaboran (Figura 5) 30 diferentes compuestos de electrolitos aplicando el siguiente proceso:

- A. Colocar 500 ml de agua destilada en un vaso de precipitación.
- B. Pesar la cantidad del compuesto químico según los niveles de concentración.
- C. Añadir el compuesto químico en el agua destilada y mezclar hasta homogenizar.



Figura 5. Preparación de los electrolitos: Vaso de precipitación (a), balanza (b), ácido cítrico (c), cloruro de sodio (d), pesaje de sulfato de cobre (e) y electrolito (f)

2.2.3. Adquisición de datos

Una vez elaborados los electrolitos, se obtienen los datos de la ppm de hidrogeno generado, para lo cual se sigue el proceso detallado en la Figura 6:

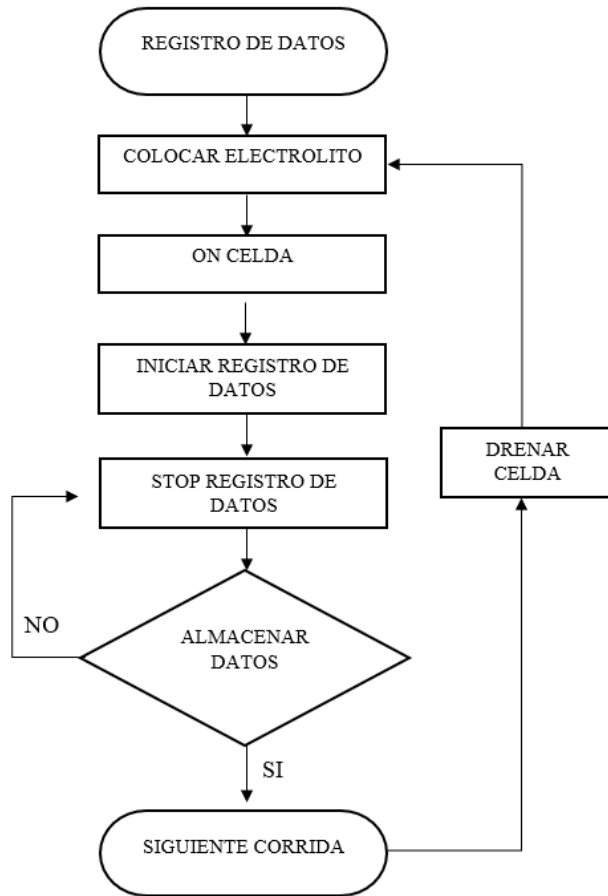


Figura 6. Flujograma de proceso para obtener los datos.

3. Resultados y discusión

El análisis de información requirió un método estadístico aplicado en el software Minitab 18. Posteriormente, la base de datos se sometió a una depuración a través de un análisis de frecuencias. Con relación al desarrollo del análisis estadístico, se plantearon las siguientes hipótesis:

A. Hipótesis Principales: Suponen un efecto principal del factor A, donde se cuenta con:

- Hipótesis nula (H_0): No hay efecto significativo del factor A en la variable dependiente (ppm de hidrógeno).

- Hipótesis alternativa (H_1): Existe un efecto significativo del factor A en la variable dependiente (ppm de hidrógeno).

Además, se analizó el factor B mediante las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0): No hay efecto significativo del factor B en la variable dependiente (ppm de hidrógeno).
- Hipótesis alternativa (H_1): Existe un efecto significativo del factor B en la variable dependiente (ppm de hidrógeno).

B. Hipótesis de Interacciones: Se trata de la interacción que puede existir entre los factores A y B, planteando:

- Hipótesis nula (H_0): No hay interacción significativa entre los factores A y B en la variable dependiente (ppm de hidrógeno).
- Hipótesis alternativa (H_1): Existe una interacción significativa entre los factores A y B en la variable dependiente (ppm de hidrógeno).

3.1. Concentración de electrolito

Conforme lo indican Guiracocha y Banegas [14], la cantidad y tratamiento de los factores a analizar permite conocer las magnitudes a usar para cada electrolito: el nivel de agua destilada (ml), el tiempo que se emplea en cada prueba experimental (min) y el número de tratamientos para cada uno de los niveles, tal como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Niveles y tratamientos de los factores

Electrolito [g]	Nivel de agua destilada H2O [ml]	Nivel de tiempo [min]	Tratamientos [#]
10	500	5	1
12	500	5	1
14	500	5	1
16	500	5	1
18	500	5	1
20	500	5	1
22	500	5	1
24	500	5	1
26	500	5	1
28	500	5	1

En la Tabla 4 se resume el modelo aplicado, con dos factores y 30 corridas base.

Tabla 4. Resumen del modelo

Elemento	#	Elemento	#
Factores:	2	Réplicas:	1
Corridas base:	30	Total de corridas:	30
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Mientras tanto, en la Tabla 5 se indica los promedios [14-25] de la generación de hidrógeno, sirviendo de base para el análisis de los resultados en esta investigación.

Tabla 5. Promedios de ppm de hidrógeno

Concentración (g)	Electrolitos (A)		
	C. Sodio	A. Cítrico	S. Cobre
	(media de ppm de hidrógeno) ^a		
10	92	76,34	98,27
12	93,37	108,61	79,24
14	77,16	583,88	103,67
16	183,5	83,56	616,37
18	84,27	206,11	83,11
20	60,71	79,63	82,99
22	74,86	94,72	50,09
24	71,72	66,39	71,67
26	72,81	97,31	74,72

28 705,36 60,8 83,58

3.2. Análisis ANOVA

El análisis realizado en el software Minitab 18 mediante un planteamiento aleatorizado permite observar que las interacciones de los factores A*B tienen efectos significativos ($p < 0,05$) dentro de la generación de hidrógeno en ppm. Es así como, la Tabla 6 indica el estadístico R-cuadrado para identificar que el modelo ajustado muestra un 97,36% la variabilidad de producción de hidrógeno en ppm en la celda seca. Además, el error estándar de la estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es de 27,669. En otras palabras, los factores A*B y B muestran efectos positivos para la generación de hidrógeno, donde los niveles más altos permiten una mayor generación de hidrogeno.

Tabla 6. Resumen ANOVA

S- Error	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
27,6699	99,82%	97,36%	59,06%

Además, el factor B tiene una interacción significativa (nivel de confianza = 95%), al contrario de A que no presenta una influencia significativa en la generación de hidrogeno (Tabla 7).

3.3. Gráfica de residuos de hidrogeno en ppm

Por otra parte, el resultado de ($p = 0,010$) en la Figura 7 permite determinar que los residuos resultaron significativos estadísticamente ($p < 0,05$), por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula (H_0). De esta manera, la variable no se distribuye como una normal. Es por ello, que estos valores no se hallen sobre la línea diagonal (línea recta).

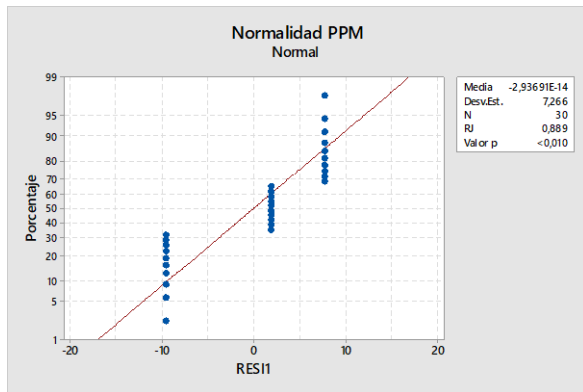


Figura 7. Test de normalidad de Smirnov-Kolmogorov

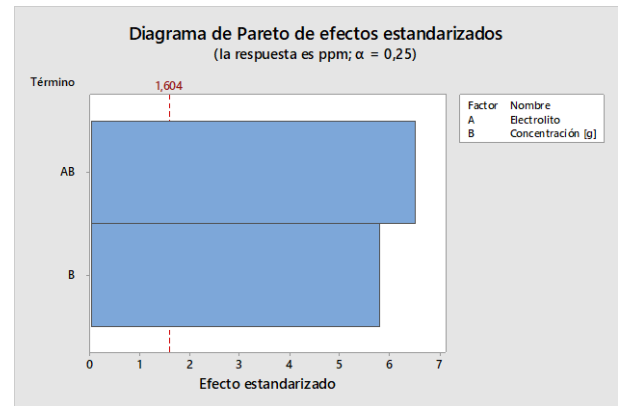


Figura 9. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

De manera similar, en la Figura 8 en el histograma no se observa una forma similar a la campana de Gauss correspondiente con la distribución normal. Sin embargo, el orden de los residuos no presenta un patrón sistemático (Residuos vs. Orden de observación), por lo tanto, se corrobora que las variables no presentan una distribución normal.

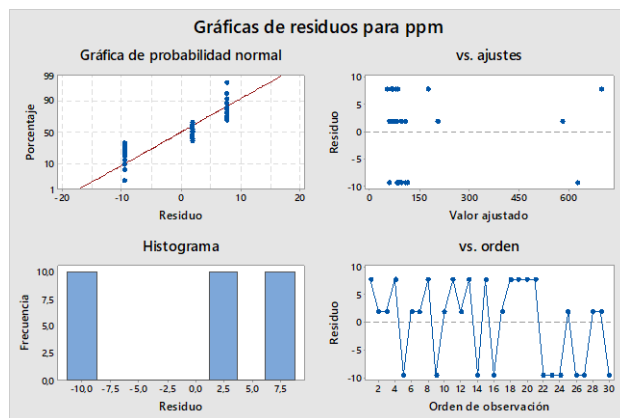


Figura 8. Gráfica de residuos de hidrogeno en ppm.

3.4. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

En la Figura 9 se muestra gráficamente el efecto significativo de la interacción entre los factores A*B, lo que constituye la variable de mayor efecto en la respuesta, seguida por el factor B.

3.5. Interacciones individuales

En la Figura 10 se exponen las interacciones individuales para evidenciar las concentraciones con mayor influencia en la producción de hidrógeno en ppm. La intercepción de la recta tiene las mayores pendientes (directiva o directrices) y, por tanto, el mayor peso en la variable de respuesta. Con igual importancia, las pendientes del factor B en algunos casos son muy pronunciadas. Es decir, las concentraciones 14, 16 y 28 ejercen un efecto medio positivo o de gran impacto en la respuesta, mientras que en las restantes su incidencia promedio es poca o negativa.

Mientras tanto, en el factor A se observó una pendiente reducida y decreciente, por lo tanto, tienen poca influencia en la variable producción de hidrogeno en ppm y el valor mayor se obtiene con el electrolito Cloruro de Sodio (> 150 ppm).

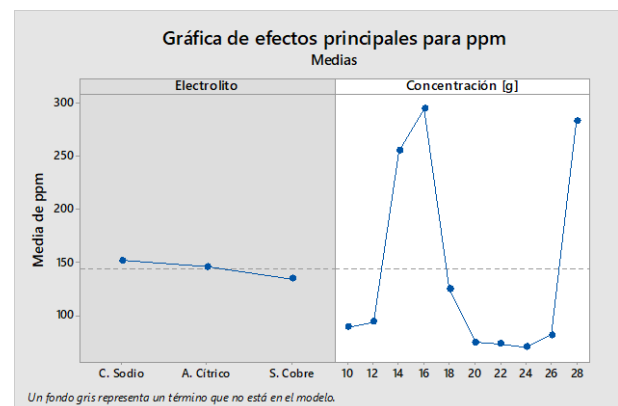


Figura 10. Interacciones individuales.

Tabla 7. Resumen estadístico

ANOVA							
Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	27	839 971	99,82%	839 971	31 110,10	40,63	0,024
Lineal	9	238 513	28,34%	238 513	26 501,40	34,61	0,028
Concentración [g]	9	238 513	28,34%	238 513	26 501,40	34,61	0,028
Interacciones de 2 términos	18	601 459	71,47%	601 459	33 414,40	43,64	0,023
Electrolito*Concentración [g]	18	601 459	71,47%	601 459	33 414,40	43,64	0,023
Error	2	1 531	0,18%	1 531	765,6		
Total	29	841.503	100,00%				

En cuanto a las interacciones de los factores A*B, en la Figura 11 se puede observar que la mayor producción media de ppm de hidrógeno se obtiene con el electrolito con cloruro de sodio y la concentración 28g, seguido del electrolito con sulfato de cobre y la concentración 16g, y, por último, el electrolito con ácido cítrico y la concentración 14g.

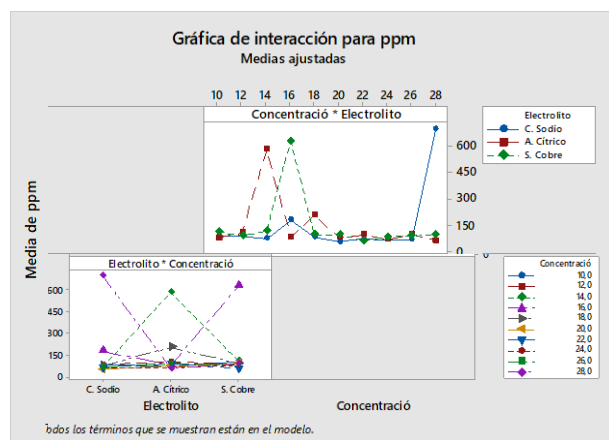


Figura 11. Interacciones de factores A*B.

3.6. Optimización de respuesta del número de pústulas

La configuración óptima dentro del diseño experimental factorial (Figura 12) considera tanto el tipo de electrolito como su concentración, puede identificarse en la concentración de 28 g de cloruro de sodio. Esta configuración específica resulta en

una eficiencia máxima, evidenciada por la producción de 697,678 ppm de hidrógeno molecular (Tabla 8).

Tabla 8. Optimización de respuesta

Sol.	Electrolito	Conc. [g]	ppm Ajuste	Deseabilidad Compuesta
1	C. Sodio	28	697,678	0,988275
2	S. Cobre	16	625,892	0,878724
3	A. Cítrico	14	582,036	0,811795
4	A. Cítrico	18	204,269	0,235289
5	C. Sodio	16	175,821	0,191876

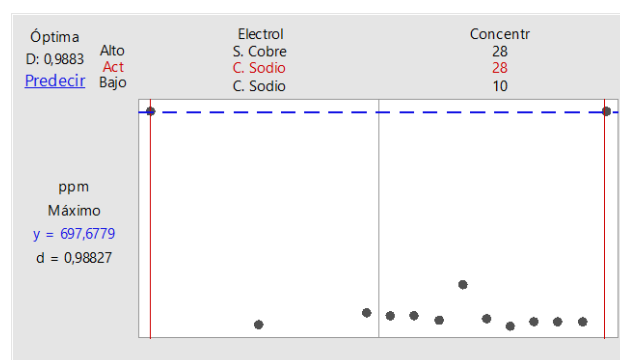


Figura 12. Optimización de respuesta del número de pústulas.

4. Conclusiones

La presente investigación realizada en una celda tipo seca utilizando distintos electrolitos, ha permitido identificar la combinación de las variables en la que se genera mayor cantidad de hidrógeno. Los resultados indican que es posible generar más cantidad de hidrógeno con una concentración de 28 g de cloruro de sodio en 500 ml de agua destilada, alcanzando una generación de 697,678 ppm de hidrógeno. En segundo lugar, se destaca la configuración que emplea 16 g de sulfato de cobre en 500 ml de agua destilada, generando 625,892 ppm de hidrógeno. Finalmente, se observa que una concentración de 14 g de ácido cítrico en 500 ml de agua destilada, permite obtener 582,036 ppm de hidrógeno. Estos resultados contribuyen significativamente al entendimiento de la dinámica de la generación de hidrógeno en la celda tipo seca y ofrecen una guía para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la producción eficiente de hidrógeno. Además, se puede concluir que el dispositivo generador de hidrógeno de celda tipo seca tiene la capacidad de suministrar hidrógeno según los datos observados.

Referencias

[1] Ministerio de Energía y Minas de Ecuador. Balance Energético Nacional. Ecuador. 2022.

[2] Asociación Ecuatoriana de Empresas Automotrices -AEADE-. El sector automotor en cifras. No. 86. Septiembre 2023.

[3] F. Morquecho, “Análisis de Rendimiento y Costo de los Combustibles Ecopaís y Super” INNOVA Research Journal vol. 3, pp. 135-149. 2018.

[4] Hosseini, A. An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles. International Journal of Green Energy. 2019

[5] A. Marín, “Pasado, Presente y Futuro del Hidrógeno en Automoción” Proyecto de titulación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona, España. Jun. 2022.

[6] Zhang, C. Review on the safety analysis and protection strategies of fast filling hydrogen storage system for fuel cell vehicle application. Journal of Energy Storage. Volume 45, January, 2022.

[7] A. Diaz, J. Gonzalez, , O. Gonzalez, “Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna” Revista UIS Ingeniería vol. 17, 99. 143-154, 2018.

[8] H. Seyed, B. Brayden “An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles.” International Journal of Green Energy vol. 17, pp. 13-57, 2020.

[9] Vásquez, D. Diseño de una máquina generadora de hidrógeno mediante electrólisis para utilizarlo como vector energético en un auto eléctrico. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/4422>. 2022.

[10] A. Rif, A. Radina, E. Sulkan, “The effect of oxy hydrogen gas addition on dry cell generator’s performance” International Electronics Symposium vol. 01, pp. 74-77, 2020.

[11] H. Gayuh, J. Pratilastiarso, A. Ghani, A. Rif, H. Ubudiyah, “The experimental study of wet cell HHO generator type with Ba (OH)₂ catalyst on performance and exhaust gaseous emissions of 4 stroke engine 120 cc” AIP Conf Proc vol. 060014 pp. 1–7. 2018.

[12] H. Prasetya, J. Pratilastiarso, R. Amalia, F. Intan, “Studi eksperimen suplai generator oxyhydrogen menggunakan katalis KOH” Jurnal Teknol Ter vol. 5 pp 42-46. 2019.

[13] Z. Stepien, “A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges” Energies vol. 14, pp. 1-26, 2021.

[14] B. Guiracocha, D. Banegas, “Evaluación del nivel de hidrogeno en la celda tipo seca con mezclas de hidróxido de sodio y agua destilada” Proyecto de titulación. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Jul. 2023.

[15] J. Cabanillas, “Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca al motor de un automóvil a gasolina para mejorar la performance energética ambiental” Proyecto de

titulación, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, 2022.

[16] J. Pesantez, J. Tacuri, “Adaptación de un generador de hidrogeno tipo celda seca en un motor endotérmico 150 cc de 4 tiempos como fuente alternativa de combustible” Proyecto de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Oct. 2021.

[17] D. Aimacaña, M. Masapanta, “Implementación de un sistema de generación de hidrógeno de celda seca en el motor de combustión interna 1800 cc Opel para determinar su influencia de los parámetros característicos” Proyecto de titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas, Quito, Ecuador. Ago. 2022.

[18] K. Puican, “Diseño de un reactor de hidrogeno de celda seca para el acoplamiento en un motor de 200 cc” Proyecto de titulación, Universidad Senior de Sipán, Chiclayo, Perú. Nov. 2022.

[19] H. Yip, A. Srna, A. Yuen, S. Kook, R. Taylor, G. Yeoh, P. Medwell, Q. Chan, “A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion” Applied Sciences vol. 9, pp. 1-30, 2019.

[20] D. Herdoiza, “Diseño y construcción de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis” Proyecto de titulación, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Mar. 2022

[21] Cruz, K. “Generación de hidrógeno por electrólisis. Estado del arte. <http://risisbi.uqroo.mx/bitstream/handle/20.500.12249/1916/TP315.2018-1916.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

[22] A. De Souza, F. Rocha, T. Rocha, “Hydrogen generator, an application with internal combustion engines” International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS) vol. 6, pp. 86-90. 2019.

[23] E. Tamayo, C. Rosales, A. Guzmán, “Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna” Ingeniería General vol. 7, pp. 43-54, 2016.

[24] E. Quezada, D. Torres, “Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo Chevrolet Steem 1.6 L” Proyecto de

titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Dic. 2014.

[25] Sanisaca, C. y Minchala, S. Evaluación del comportamiento de una celda de hidrógeno tipo seca mediante la adquisición de datos determinando el nivel de producción de hidrógeno. Tesis de pregrado. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. 2022.

[26] I. González, “Diseño de experimentos y su aplicación en la industria” Ingenio y conciencia vol. 1, 2007.