



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

**GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE SEÑALES ELECTRÓNICAS
EN DIFERENTES FRECUENCIAS**

PRESENTADA POR:

DAVID SALINAS MENDOZA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE**

PUNO, PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE**

TESIS

**GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE SEÑALES ELECTRÓNICAS
EN DIFERENTES FRECUENCIAS**



PRESENTADA POR:

DAVID SALINAS MENDOZA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE


.....
Dra. MYRIAM EUGENIA PACHECO TANAKA

PRIMER MIEMBRO


.....
Dr. IVAN DELGADO HUAYTA

SEGUNDO MIEMBRO


.....
Dr. MAXIMO AMANCIO MONTALVO ATCO

ASESOR DE TESIS


.....
Dr. ANGEL MANUEL OLAZABAL GUERRA

Puno, 06 de diciembre de 2019

ÁREA: Ciencias, Tecnología y Medio Ambiente.

TEMA: Generación de Hidrógeno mediante señales electrónicas.

LÍNEA: Evaluación Tecnológica y del Medio Ambiente.



DEDICATORIA

A mi mamá Leonor por su apoyo y fe en mí,

a la memoria de Serapio mi papá,

a mis hermanos Diego e Ivan

y a todos los seres que amo.



AGRADECIMIENTOS

- Mi agradecimiento a todas las personas que me enseñaron y formaron.
- A la Universidad Nacional del Altiplano quien me otorgó las oportunidades para llegar a este punto en mi vida.
- A la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, la cual me formó como Maestro en Ciencias y consolidó mi formación.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
 CAPÍTULO I REVISIÓN DE LITERATURA 	
1.1 Antecedentes de la investigación	2
1.2 Marco teórico	3
1.2.1 Hidrógeno	3
1.2.2 Formas de obtención de hidrógeno	6
1.2.3 Celda de combustible	7
1.2.4 Electrolisis	8
1.3 Señales electrónicas de frecuencia	10
1.3.1 Señales	10
1.3.2 Señales continuas	11
1.3.3 Señales discretas	11
1.4 Oscilaciones	11
1.5 Características de las señales	13
1.5.1 Amplitud (A)	13
1.5.2 Periodo (T)	13
1.5.3 Frecuencia (F)	13
1.5.4 Frecuencia angular (W)	14
1.6 Movimiento armónico simple (MAS)	14
1.6.1 Características de las señales	17
1.7 Movimiento sobre amortiguado	18



1.8 Oscilaciones forzadas (resonancias)	18
1.9 Osciladores	
1.10 Especificaciones de la respuesta de un sistema en el dominio del tiempo	19
1.11 Identificadores lineales	20
1.11.1 Estructura del modelo	21
1.11.2 Etapas para la identificación de modelos lineales	22

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Planteamiento del problema	24
2.1.1 Problema general	24
2.1.2 Problemas específico	s24
2.2 Hipótesis	25
2.2.1 Hipótesis general	25
2.2.2 Hipótesis específicas	25
2.3 Objetivos ²⁵	
2.3.1 Objetivo general	25
2.3.2 Objetivos específicos	25

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ámbito o lugar de estudio	26
3.2 Población y muestra	26
3.3 Materiales	26
3.4 Metodología	27
3.4.1 Metodologías para el primer objetivo específico	27
3.4.1.1 Implementación de la celda de generación de hidrógeno	27
3.4.1.2 Circuito electrónico para la celda de hidrógeno	28
3.4.1.3 Etapa de sensado del hidrógeno	33
3.4.2 Metodología para el segundo objetivo específico	35
3.4.2.1 Primer experimento	35
3.4.2.2 Segundo experimento	35



3.4.2.3 Tercer experimento	35
3.4.2.4 Cuarto experimento	36
3.4.3 Metodología para el tercer objetivo específico	36
3.4.3.1 Primera estimación	36
3.4.3.2 Segunda estimación	38
3.4.3.3 Tercera estimación	39
3.4.3.4 Cuarta estimación	40

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del primer objetivo específico	43
4.1.1 Resultados de la simulación	43
4.1.2 Resultados de la medición del circuito	45
4.1.3 Discusión del primer objetivo específico	45
4.2 Resultados del segundo objetivo específico	46
4.2.1 Resultados del primer experimento	46
4.2.2 Resultados del segundo experimento	47
4.2.2.1 Entrada señal senoidal a 10Hz	47
4.2.2.2 Entrada señal senoidal a 100Hz	48
4.2.2.3 Entrada señal senoidal a 500Hz	49
4.2.2.4 Entrada señal senoidal a 1kHz	50
4.2.2.5 Entrada señal senoidal a 5kHz	51
4.2.2.6 Entrada señal senoidal a 10kHz	52
4.2.2.7 Entrada señal senoidal a 50kHz	53
4.2.2.8 Entrada señal senoidal a 100kHz	54
4.2.2.9 Entrada señal senoidal a 500kHz	55
4.2.2.10 Entrada señal senoidal a 1MHz	56
4.2.3 Resultados del tercer experimento	58
4.2.3.1 Entrada señal cuadrada a 10Hz	58
4.2.3.2 Entrada señal cuadrada a 100Hz	59
4.2.3.3 Entrada señal cuadrada a 500Hz	60
4.2.3.4 Entrada señal cuadrada a 1kHz	61



4.2.3.5	Entrada señal cuadrada a 5kHz	62
4.2.3.6	Entrada señal cuadrada a 10kHz	63
4.2.3.7	Entrada señal cuadrada a 50kHz	64
4.2.3.8	Entrada señal cuadrada a 100kHz	65
4.2.3.9	Entrada señal cuadrada a 500kHz	66
4.2.3.10	Entrada señal cuadrada a 1MHz	67
4.2.4	Resultados del cuarto experimento	68
4.2.4.1	Entrada señal triangular a 10Hz	68
4.2.4.2	Entrada señal triangular a 100Hz	69
4.2.4.3	Entrada señal triangular a 500Hz	70
4.2.4.4	Entrada señal triangular a 1kHz	71
4.2.4.5	Entrada señal triangular a 5kHz	72
4.2.4.6	Entrada señal triangular a 10kHz	73
4.2.4.7	Entrada señal triangular a 50kHz	74
4.2.4.8	Entrada señal triangular a 100kHz	75
4.2.4.9	Entrada señal triangular a 500kHz	76
4.2.4.10	Entrada señal triangular a 1MHz	77
4.2.5	Discusión de los resultados de la onda senoidal	78
4.2.6	Discusión de los resultados de la onda cuadrada	80
4.2.7	Discusión de los resultados de la onda triangular	82
4.2.8	Discusión de los resultados entre la señal continua a 5V, senoidal, cuadrada y triangular	84
4.3	Resultados de la expresión matemática de la celda de hidrógeno	85
4.3.1	Primera estimación	n85
4.3.2	Segunda estimación	86
4.3.3	Tercera estimación	87
4.3.4	Cuarta estimación	n88
4.3.5	Discusión de los resultados de la expresión matemática de la celda de hidrógeno	89
CONCLUSIONES		95
RECOMENDACIONES		96
BIBLIOGRAFÍA		97
ANEXOS		100



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.	
1	Propiedades termodinámicas del agua y sus componentes (hidrógeno y oxígeno) en condiciones normales de presión y temperatura	7
2	Valores calculados y simulados del circuito de potencia	43
3	Resultados obtenidos de la medición de circuito de potencia	45
4	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada de 5v, continua	46
5	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada senoidal de 10Hz	48
6	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de senoidal 100Hz	49
7	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada de senoidal de 500Hz	50
8	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal senoidal de 1kHz	51
9	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal senoidal de 5kHz	52
10	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal senoidal de 10kHz	53
11	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal senoidal de 50kHz	54
12	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal senoidal de 100kHz	55
13	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal senoidal de 500kHz	56
14	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal senoidal de 1MHz	57
15	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 10Hz	58
16	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 100Hz	59



17	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 500Hz	60
18	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 1kHz	61
19	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 5kHz	62
20	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 10kHz	63
21	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 50kHz	64
22	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 100kHz	65
23	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 500kHz	66
24	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 1MHz	67
25	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 10Hz	68
26	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 100Hz	69
27	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 500Hz	70
28	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 1kHz	71
29	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 5kHz	72
30	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 10kHz	73
31	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 50kHz	74
32	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 100kHz	75



33	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 500kHz	76
34	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 1MHz	77
35	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada seno a diferentes frecuencias	78
36	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada a diferentes frecuencias	80
37	Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular a diferentes frecuencias	82
38	Mayores cantidades de producción de hidrógeno entre las señales de entrada continua, senoidal, cuadrada y triangular	84
39	Criterios de desempeño la respuesta de la primera estimación	86
40	Criterios de desempeño la respuesta de la segunda estimación	87
41	Criterios de desempeño la respuesta de la tercera estimación	88
42	Criterios de desempeño la respuesta de la cuarta estimación	89
43	Criterios de desempeño entre la señal de referencia y las cuatro estimaciones	90



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1	Electrolisis del agua y balance energético 6
2	Esquema de una celda individual de combustible 8
3	Electrolisis del agua 9
4	Resorte uniformemente helicoida 112
5	Movimiento Armónico Simple 14
6	Propiedades del movimiento armónico simple 15
7	Movimiento amortiguado 17
8	Esquema básico de retroalimentación para formar un oscilador 18
9	Criterios de la respuesta de sistemas lineales 20
10	Criterios de estimación 23
11	Celda de hidrógeno fabrica 28
12	Amplificador operacional modo no inversor 29
13	Diagrama circuital de la etapa de adaptación y potencia para la celda de generación de hidrógeno 30
14	Red de polarización de transistores de potencia 31
15	Amplificador de potencia 32
16	Sensor de Hidrógeno MQ-8 33
17	Circuito de conexión del sensor MQ-8 34
18	Módulo de adruino MQ-8 34
19	Diagrama de bloques de la celda de hidrógeno y la etapa electrónica 35
20	Señales de entrada y salida de la celda de generación de hidrógeno 36
21	Respuesta del estimador para una función de primer orden 37
22	Respuesta del estimador para una función de primer orden con un cero 38
23	Respuesta del estimador para una función de segundo orden. 40
24	Respuesta del estimador para una función de segundo orden un polo 41
25	Diagrama circuital de simulación 44
26	Señal de entrada 5V, señal de salida de Hidrógeno 46
27	Criterios desempeño para una entrada 5V 47
28	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 10Hz 48
29	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 100Hz 49
30	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 500Hz 50



31	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 1kHz	51
32	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 5kHz	52
33	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 10kHz	53
34	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 50kHz	54
35	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 100kHz	55
36	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 500kHz	56
37	Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 1MHz	57
38	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 10Hz	58
39	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 100Hz	59
40	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 500Hz	60
41	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 1kHz	61
42	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 5kHz	62
43	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 10kHz	63
44	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 50kHz	64
45	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 100kHz	65
46	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 500kHz	66
47	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 1MHz	67
48	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 10Hz	69
49	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 100Hz	70
50	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 500Hz	71
51	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 1kHz	72
52	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 50Hz	73
53	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 10kHz	74
54	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 50kHz	75
55	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 100kHz	76
56	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 500kHz	77
57	Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 1MHz	78
58	Criterios de desempeño para la primera estimación	86
59	Criterios de desempeño para la segunda estimación	87
60	Criterios de desempeño para la tercera estimación	88
61	Criterios de desempeño para la cuarta estimación	89



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1 Hoja de datos del sensor de hidrógeno	101
2 Fotos del sistema implementado	103
3 Código fuente para la caracterización de señales	105
4 Código fuente para la estimación de señales	109

RESUMEN

El presente trabajo de tesis desarrolló un sistema de generación de hidrógeno mediante señales electrónicas en diferentes frecuencias. La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional del Altiplano en el periodo comprendido entre los años 2018-2019. El objetivo general del trabajo de tesis fue emplear señales electrónicas en diferentes frecuencias para mejorar de producción de hidrógeno, se tuvo como primer objetivo específico es el diseño del sistema electrónico para la generación de señales electrónicas de voltaje y amperaje necesario aplicado a la celda de generación de hidrógeno, el segundo objetivo específico fue determinar el tipo de señal electrónica que mejoraría la generación de hidrógeno, el tercer objetivo específico fue establecer la expresión matemática que relacione la generación de hidrógeno. El método que se utilizó, fue el método experimental deductivo. Los resultados fueron la mejora de producción de hidrógeno utilizando señales senoidales en el rango de frecuencias desde los 5kHz hasta lo 50kHz, puntualmente en la frecuencia de 50kHz fue de donde se obtuvo la mayor cantidad de producción de hidrógeno, frente a señales cuadradas, triangulares las cuales fueron aplicadas a una celda de generación de hidrógeno en frecuencias cuyos valores fueron de 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, 100kHz, 500kHz y 1MHz y una señal continua de amplitud de 5V. La expresión matemática que representó la celda de generación de hidrógeno fue una ecuación diferencial de primer orden, determinada mediante estimadores. Los criterios de tiempo de retardo, tiempo de subida, tiempo de asentamiento, y los valores de hidrógeno en esos tiempos se utilizaron para el análisis de las señales. La etapa de diseño e implementación del sistema electrónico de potencia se logró con éxito debido a que los valores calculados, simulados y medidos tienen errores menores al 1%.

Palabras clave: Electrónica, Hidrógeno, frecuencia, Señal, modelamiento

ABSTRACT

This research developed a hydrogen generation system using electronic signals at different frequencies. The research was carried out in the laboratories of the professional school of electronic engineering of the national university of the Altiplano in the period 2018-2019. The overall objective of the thesis work was to use electronic signals at different frequencies to improve hydrogen production, the first specific objective was the design of the electronic system for the generation of electronic signals of voltage and amperage applied to the hydrogen generation cell, the second specific goal was to determine type of electronic signal that would improve hydrogen generation, the third specific goal was to establish the mathematical expression that relationship hydrogen generation. The method that was used was the experimental deductive method. The results were the improvement of hydrogen production using sine signals in the frequency range from 5kHz to 50kHz, punctually at the frequency of 50kHz was from where the highest amount of hydrogen production was obtained, versus signals square, triangular which were applied to a hydrogen generation cell at frequencies whose values were 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, 50kHz, 100kHz, 500kHz and 1MHz and a continuous 5V amplitude signal. The mathematical expression that represented the hydrogen generation cell was a first-order differential equation, determined by estimators. Delay time, upload time, settlement time, and hydrogen values at those times were used for signal analysis. The design and implementation stage of the electronic power system was successfully achieved because the calculation, simulated and measured values have errors less than 1%.

Keywords: Electronics, frequency, hydrogen, signal, modeling.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la búsqueda de una nueva matriz energética diferente a los combustibles fósiles se hace más notoria, una opción de fuente de energía alternativa es el hidrógeno, el cual es un combustible abundante y no contaminante en el planeta.

Una forma de la producción de hidrógeno es mediante el proceso de electrolisis el cual, consiste básicamente en hacer circular señales eléctricas en agua para romper la unión molecular de hidrógeno y oxígeno, método que generalmente se hace con el uso de señales eléctricas continuas.

En la presente tesis se presenta el problema de diseñar e implementar un sistema de generación de hidrógeno con la señal y frecuencia adecuada con la cual se consiga la mayor producción de hidrógeno.

Siendo esta una opción poco aplicada a la generación de hidrógeno, se realiza un estudio a frecuencias de 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, 100kHz, 500kHz y 1MHz, en señales senoidales, cuadradas y triangulares.

El análisis de las señales se realiza utilizando los criterios de tiempo de retardo, tiempo de subida, tiempo de asentamiento y los valores de hidrógeno evaluados en esos tiempos

Se diseña e implementa de un sistema electrónico que tenga las características necesarias para aplicar las señales a la celda de hidrógeno.

Se plantea obtener una expresión matemática que relacione la generación de hidrógeno con la señal de entrada, expresión que será desarrollada mediante estimadores.

CAPITULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Antecedentes de la investigación

En el primer trabajo titulado: Estudio de producción de H₂ con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia, se detalla los resultados de un estudio técnico-económico y ambiental sobre la producción de hidrógeno (H₂) como vector energético, para una futura Economía de Hidrógeno en Colombia en aprovechamiento de abundantes recursos hidroeléctricos. Concluyendo con lo siguiente: 1) Se puede concluir como resultado de este estudio que existen en esta primera aproximación indicaciones positivas de la viabilidad técnica, económica y ambiental para el aprovechamiento en un futuro cercano de abundante H₂ producido en Colombia con los suficientes recursos hidroeléctricos con que cuenta este país, como contribución a un desarrollo sostenible dentro de una Economía de Hidrógeno globalizada. El caso estudiado se presenta acorde con tendencias recientes en el campo energético, de aprovechamiento energético, en este caso el H₂, basada su producción en una energía renovable como la hidroeléctrica, utilizando una central de mediano tamaño de bajo impacto ambiental, acorde, a la vez, con la tendencia hacia la generación distribuida. Se abre, además, la posibilidad para el país de exportar energía en forma de H₂. Es importante, por tanto, continuar los estudios para completar los elementos necesarios para establecer la factibilidad del proyecto que se propone. 2) En relación con la transmisión de la energía para las distancias consideradas, dentro de las dos opciones, de conducción de H₂ por gaseoducto o el transporte de electricidad para producir el H₂ en sitio cercano al consumidos, se demostró que aun siendo bastante costoso el gaseoducto y de mayor impacto ambiental esta alternativa sería la más indicada en caso de no contar electricidad suficientemente

barata para la transmisión de energía por el sistema eléctrico.3) Dado el peso del costo de la electricidad en la producción de H_2 , las perspectivas de un proyecto como el propuesto cambiarían favorablemente con las mejoras tendientes al aumento de las eficiencias que se vienen logrando en las tecnologías de las celdas electroquímicas. 4) Por último los resultados de este estudio son indicativos de un punto de partida para realizar investigaciones de mayor alcance, más si se tiene en cuenta los avances que se están produciendo asociados al H_2 , todo en búsqueda del beneficio de un desarrollo sostenible.(Carvajal-Osorio et al., 2010).

El segundo trabajo: Diseño e Implementación de un Prototipo Eliminator de la Bacteria *Helicobacter Pylori* por Medio de Frecuencias Aplicado a Cultivo de Cepas, estableció que la eliminación de bacterias *Helicobacter pylori* se obtienen resultados adecuados buscando la frecuencia y señal de onda adecuada, situación que pude ser aplicada a la generación de hidrógeno.(Soto Chirinos & Huanca Coa, 2014).

El tercer trabajo: El Hidrógeno, Combustible del Futuro: ¿Por qué, Cómo y Dónde?, determina que el uso del hidrógeno en la llamada “economía del hidrógeno” posibilita una enorme redistribución del poder económico, consecuencias trascendentales para la sociedad. El actual flujo de energía, controlado por las empresas petrolíferas y las empresas de servicios, quedará obsoleto. En la nueva era todo ser humano podrá convertirse en productor además consumir de su propia energía, a decir la denominada “generación distribuida”.(Américo & Visintin, 2010).

Y en el cuarto trabajo: Dynamic Modeling of a Wind-Diesel-Hydrogen Hybrid Power System. Edit. Faculty of engineering and Applied Science, determina en su estudio que un modelo dinámico de viento e hidrógeno basado en un sistema de poder Ramea fue implementado siendo el hidrógeno almacenado una nueva aproximación adoptada en el sistema. (Kotte, Tech, Ahad, & A., 2011).

1.2 Marco teórico

1.2.1 Hidrógeno

El hidrógeno es un cuerpo simple (H) de número atómico 1, peso atómico 1,008, elemento gaseosos, que entra en la composición del agua.(Larousse, Augé, & de Toro, 1912)

Se llama así porque, al combinarse con el oxígeno, forma agua. Lo descubrió Cavendish 1781. Es inflamable y arde con llama pálida; siendo catorce veces más ligero que el aire, se emplea para inflar los globos aerostáticos, pero atraviesa muy fácilmente las paredes de los recipientes que lo contienen, el átomo de este elemento químico es el más sencillo de todos, no se encuentra libre más que en escasas emanaciones volcánicas y en las altas regiones atmosféricas, al estado libre forma parte notable de la cromosfera solar y de algunas estrellas, combinado con lo que da la naturaleza, sobre todo en el agua, los ácidos y en las sustancias orgánicas como petróleo, azúcar, celulosa. (Sharpe, 1998)

- Dentro de las propiedades físicas se cuentan las siguientes:
- El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y sin sabor.
- De peso 14.44 veces menor que del aire. Es el más ligero de los gases.
- Es muy difícil de liquidar, pues no lo hace sino a temperaturas inferiores a -242°C , que es su “punto crítico”, teniendo que mediar además la presión.
- El hidrógeno líquido, enfriado y por una evaporación rápida a presión reducida, se solidifica a una masa transparente que se funde a -257°C , hierve -252°C .

Es muy fusionable, por causa de su ligereza atraviesa fácilmente las paredes porosas, lo cual puede patentizarse usando un vaso de porcelana sin barnizar, cerrado con un tapón atravesado con dos tubos uno conductor de hidrógeno, y otro vertical cuyo extremo se introduce en agua. Al cabo de un rato se interrumpe la llegada del gas, observase entonces la ascensión de agua en el vaso, debida al vacío parcial que deja el gas al escaparse.

Otra propiedad del hidrógeno es la de ser ocluido por algunos metales, como el cobalto muy dividido, la esponja de platino y sobre todo el paladio, que puede absorber más de 900 veces su volumen de hidrógeno; con la oclusión crece el volumen y disminuye la densidad del metal. El fenómeno va acompañado de calor.

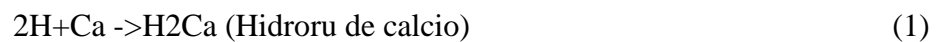
Dentro de sus propiedades químicas se pueden mencionar:

Se une directamente con los halógenos, manifestando distintos grados de afinidad, formando los hidrácidos. Con el grupo del azufre también da hidrácidos.

Es combustible. Se combina directamente con el oxígeno, con gran desprendimiento de calor, produciendo agua. La combustión del hidrógeno da lugar a una serie de vibraciones que se vuelven perceptibles encerrando la llama en un tubo abierto por ambos extremos. Se produce entonces un sonido continuo al que se le ha dado el nombre de ARMONÍA QUÍMICA.

Es incomburente, pues los cuerpos no arden en una atmósfera de hidrógeno.

Con algunos metales da hidruros como se muestra la Ecuación 1.



Forma compuestos con el grupo de N: Amoníaco (NH_3); fosfatina (PH_3); Arsenamina (AsH_3); Estibamina (SbH_3).

Con el carbono forma los hidrocarburos: SiH_4 , CH_4 metano.

La afinidad que tiene por el oxígeno, el cloro, se utiliza en la reducción de sustancias.

El hidrógeno en el momento de desprenderse en la reacción cuando aún no se ha unido con otro átomo para formar la molécula, se llama “hidrógeno naciente o atómico”.

Dentro de sus aplicaciones se usa en:

Por ser reductor, para la obtención de metales y de colorantes.

Por su ligereza, para inflar globos.

Por su poder calorífico, en el soplete oxhidrico aparato que consta de dos tubos por los que llega O_2 y H_2 , respectivamente, hasta el orificio de salida, en donde se les prende fuego y producen en su combustión una llama cuya temperatura sobrepasa los 2000°C . Esta llama funde los metales y logra con suma facilidad cortarlos o fundirlos, según interese. En esto se basa la llamada “soldadura autógena”.

Para obtener una luz viva (Drummond). Se dirige la llama del soplete oxhídrico sobre un bloque de cal viva o magnesia; produce una luz deslumbradora.

Otros usos de gran interés industrial corresponden a su empleo en la síntesis del amoníaco y de la gasolina sintética y en la solidificación de grasas y aceites. (Sharpe, 1998)

Por otra parte (Pons, Muzzo & Binda, Arana, 1976), indica que las propiedades físicas del hidrógeno son: combustión, combinándose con el oxígeno para formar agua y constituyendo con el aire una mezcla explosiva. Es reductor, por su tendencia a quitar oxígeno a otras sustancias para formar agua.

Las propiedades químicas del hidrógeno son: combustible, combinándose con el oxígeno para formar agua y constituyendo con el aire una mezcla explosiva. Es reductor, por su tendencia a quitar oxígeno a otras sustancias para formar agua.

1.2.2 Formas de obtención de hidrógeno

La producción de hidrógeno por electrolisis, las dos tecnologías actualmente más desarrolladas para la electrólisis se basan, una, en membranas poliméricas o de intercambio de protones PEM (por sus siglas en inglés: proton exchange membrane) y, otra, la de electrolito líquido, como el hidróxido de potasio, también trabajándose con electrolitos sólidos o gelatinosos (Hortal & Barreras, 2005). En ambos casos, se produce la disociación de la molécula de agua por acción de una corriente eléctrica aplicada a dos electrodos separados por el electrolito o una membrana que permite sólo el paso de los iones positivos, produciéndose hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo como se observa en la figura 1.

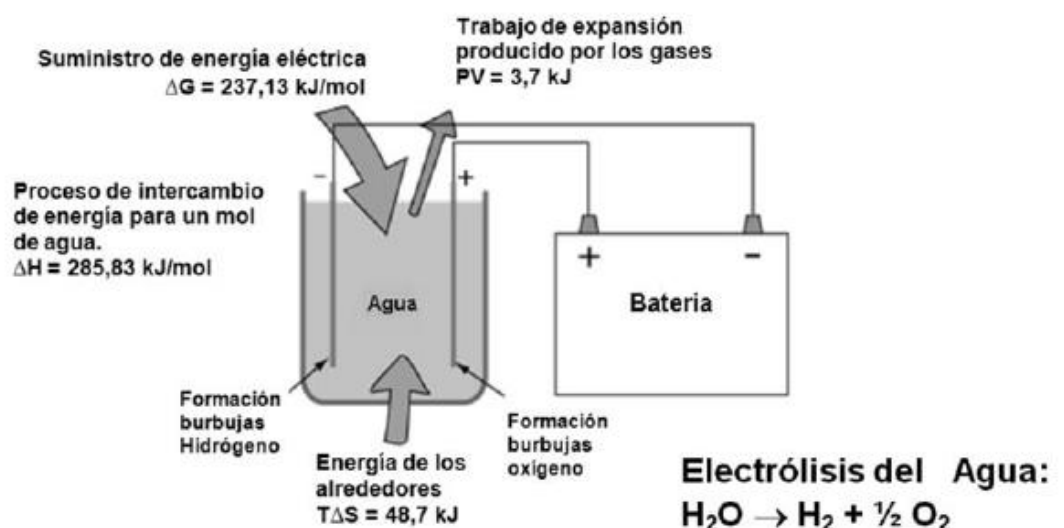


Figura 1. Electrolisis del agua y balance energético

Fuente: (Electrolysis of Water and Fuel Cell Operation, 2009)

El electrolizador tipo PEM es prácticamente una celda de combustible funcionando en forma inversa, con las mismas reacciones electroquímicas pero ocurriendo en sentido contrario; por lo tanto, se aplican indistintamente las mismas reacciones electroquímicas pero ocurriendo en sentido contrario; por lo tanto se aplican indistintamente las mismas ecuaciones de balance energético están en la tabla 1.

Tabla 1

Propiedades termodinámicas del agua y sus componentes (hidrógeno y oxígeno) en condiciones normales de presión y temperatura

Elemento (1 mol H ₂ O)	H ₂ O	H ₂	O ₂	CAMBIO
Entalpía (h) (kJ/mol)	-285.83	0	0	$\Delta h=285.83$
Entropía (s) (kJ/K)	69.91	130.68	205.14/2	$\Delta s=48.7$
Cambio Energía de Gibbs:	Δg (a T=298 K)= $\Delta h-T$		$\Delta s=237.1$ kJ/mol	

Fuente: Recuperado de (Wark & Richards, 2000)

La descomposición del agua requiere, en a las condiciones ideales y a temperatura y presión constantes, una cantidad de energía dada por el cambio de la energía libre de Gibbs (AG) de los reactantes (Wark & Richards, 2000), valor que resulta casi igual al poder calorífico del combustible, (LHV o HHV, del inglés: “low” o “high heating value”). La tabla 1 indica estos valores para el agua y el cálculo necesario para obtener un valor de AG.

1.2.3 Celda de combustible

La celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica. La básica estructura física o bloque de construcción de una celda de combustible consiste en una capa de electrolito en contacto con un ánodo y cátodo en contado. Una representación esquemática de una celda de combustible con un productor reactante y una condición de flujo de iones se observa en la figura 2.

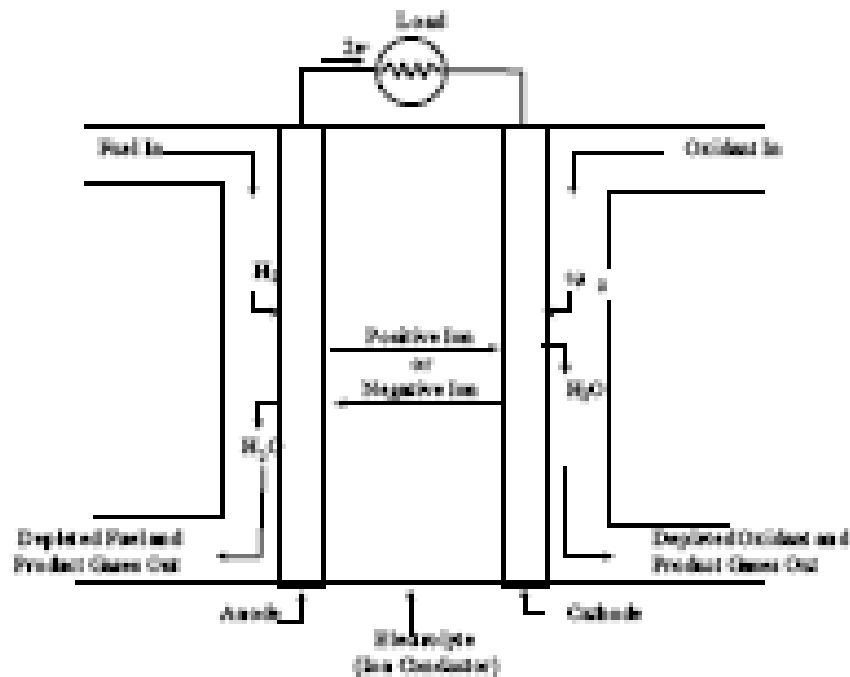


Figura 2. Esquema de una celda individual de combustible

Fuente: (Inc., Inc, & of Energy, 2016)

En una típica celda de combustible, fluidos gaseosos son enviados continuamente al ánodo (electrodo negativo). (Inc. *et al.*, 2016)

El sistema de generación de hidrógeno se construye de acuerdo a (Myla, 2013), en el cual se indica que la construcción y funcionamiento del sistema se debe a la electrolisis.

1.2.4 Electrolisis

La electrolisis del agua está definida como la descomposición de agua en los gases oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2) por medio de una corriente eléctrica continua conectada al agua por medio de electrodos. En la Figura 3 aparece un esquema de funcionamiento de un proceso de electrolisis general.

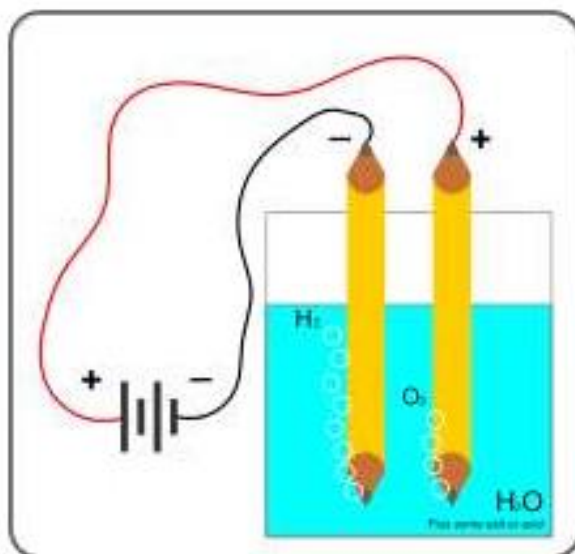


Figura 3. Electrólisis del agua

Fuente: (Romero, 2018)

Normalmente, se añade un electrolito fuerte (por ejemplo, hidróxido de sodio NaOH), para aumentar la conductividad del agua mejorando de esta forma la transmisión de corriente. Se conecta la fuente de energía a los dos electrodos, fabricados normalmente con metales inertes para que no intervengan en la reacción (acero inoxidable y platino los más usuales) que estarán en contacto con el agua. Aparecerá una carga en cada uno de los electrodos, por lo que pasarán a diferenciarse a partir de ahora como cátodo (cargado negativamente, electrodo en el que se producirá la reacción de reducción) y ánodo (cargado positivamente, en este electrodo se produce la reacción de oxidación). En resumen, se pueden considerar varias fases en el proceso completo de electrólisis: - Ionización: Fase previa de disolución del compuesto antes de que entre en contacto con la corriente eléctrica. - Orientación: Con la corriente eléctrica activa, los iones, según su carga positiva o negativa, se dirigen hacia cátodo y ánodo. - Descarga: Los aniones, ya situados en el ánodo, ceden electrones, mientras que los cationes, localizados en el cátodo, adquieren electrones. Se pueden distinguir dos casos para las reacciones implicadas: (Romero, 2018)

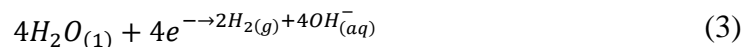
Nivel básico

Ánodo según la Ecuación 2.



$$E_{O_2/OH} = 0.4V$$

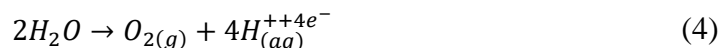
Cátodo según la Ecuación 3.



$$E_{O_2/OH_2} = -0.83V$$

- Medio ácido

Ánodo según la Ecuación 4.



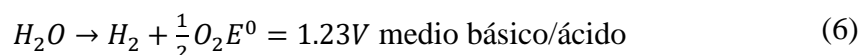
$$E_{O_2/H_2O}^0 = 1.23V$$

Cátodo según la Ecuación 5.



$$E_H = 0V$$

En la Ecuación 6 se ve la reacción global en ambos casos es la suma de las semireacciones:



1.3 Señales electrónicas de frecuencia

1.3.1 Señales

Una señal es un fenómeno variante que puede ser medido, es frecuentemente una cantidad física que varía en el tiempo, pueden variar otros parámetros en el tiempo, Ejemplos incluye el sonido, las señales de voltaje, las señales de radar o la transmisión de video. (Weeks, 2007)

Una señal también se puede definir como cualquier magnitud física que varía con el tiempo, el espacio o cualquier otra cosa o variables independientes. Matemáticamente, describimos una señal como una función de una o más variables independientes. (Proakis & Manolakis, 2007)

Una señal es generalmente algo que contiene información, se puede decir que es la expresión matemática que va contener información.

Las señales generalmente contienen información de un estado o propiedad física de un sistema, frecuentemente son caracterizadas por el propósito de comunicar información.

Por ejemplo, una señal puede representar el habla o los bytes de un sistema de información y comunicaciones.

Las señales son clasificadas dentro de señales analógicas y discretas, una señal analógica se puede representar como $x_a(t)$, la cual tiene una variable t y puede representar cualquier cantidad física, pero se asume la variable t en segundos, una señal discreta es denotada por $x(n)$, en la cual la variable n es un número entero y representa instantes de tiempo discreto. (Ingle & Proakis, 2011)

Las señales pueden describir una amplia variedad de fenómenos físicos. Aunque las señales pueden representarse de muchas formas, en todos los casos la información en una señal está contenida en un patrón de variaciones que presenta alguna forma determinada. (Oppenheim, Willsky, Nawab, & Hernández, 1998)

1.3.2 Señales continuas

Las señales continuas son aquellas que son representadas por función en el dominio del tiempo continuo, en las cuales no está permitida la discontinuidad de funciones.

1.3.3 Señales discretas

Las señales discretas son aquellas que son representadas en funciones de tiempo discreto, en el dominio del tiempo discreto sólo se permite el uso de valores enteros de tiempo, las señales discretas pueden ser utilizadas en cualquier parte del mundo moderno incluyendo los campos de telecomunicaciones, procesamiento del habla, Consumos electrónicos, sistemas biomédicos, procesamiento de imágenes, electrónica militar, aeroespacial y automóviles electrónicos y aplicaciones industriales. (Shenoi, 2005)

1.4 Oscilaciones

Uno de los movimientos más importantes observados en la naturaleza es el movimiento oscilatorio (o vibratorio). Una partícula oscila cuando se mueve

periódicamente con respecto a su posición de equilibrio (Alonso & Finn, Edward, 1976). Muchos objetos vibran u oscilan, por ejemplo, un objeto en el extremo de un resorte, un diapasón, la rueda balancín de un reloj antiguo, un péndulo, una regla de plástico sostenida firmemente sobre el borde de una mesa y golpeada suavemente, las cuerdas de una guitarra o un piano. Las arañas detectan a sus presas gracias a las vibraciones en sus redes; los automóviles oscilan hacia arriba y hacia abajo cuando golpean un tope; los edificios y los puentes vibran cuando pasan camiones pesados o el viento es intenso. De hecho, debido a que la mayoría de los sólidos son elásticos, vibran (por lo menos brevemente) cuando reciben un impulso. En los aparatos de radio y televisión ocurren oscilaciones eléctricas. Al nivel atómico, los átomos vibran dentro de una molécula, y los átomos de un sólido vibran con respecto a sus posiciones relativamente fijas. Debido a que es tan común en la vida diaria y ocurre en tantas áreas de la física, el movimiento oscilatorio es de gran importancia. (Giancoli, 1997)

Cuando un objeto vibra u oscila, yendo y viniendo, sobre la misma trayectoria, cada oscilación toma la misma cantidad de tiempo y el movimiento es periódico. El ejemplo mayor usado para la explicación de las oscilaciones de movimiento periódico se representa mediante un objeto que oscila en el extremo de un resorte uniforme helicoidal, suponemos que la masa del resorte se puede despreciar y que el resorte está montado horizontalmente (figura 4a), de manera que el objeto de masa m se desliza sin fricción sobre la superficie horizontal. Todo resorte tiene una longitud natural a la cual la fuerza neta sobre la masa m es cero. La posición de la masa en este punto se llama posición de equilibrio.

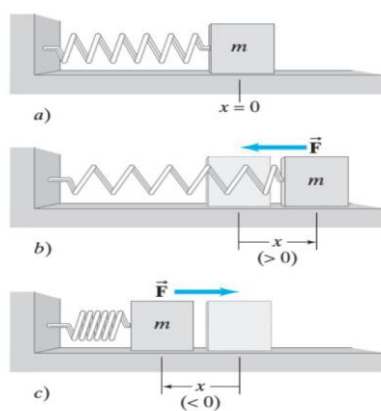


Figura 4. Resorte uniformemente helicoidal

Fuente: (Giancoli, 1997)

Si la masa se mueve ya sea hacia la izquierda, comprimiendo al resorte, o bien hacia la derecha, estirándolo, el resorte ejerce una fuerza sobre la masa que actúa en el sentido de regresar a la masa a la posición de equilibrio; por consiguiente, la fuerza se llama fuerza restauradora según la Ecuación 7. Consideramos la situación común en la que suponemos que la fuerza restauradora F es directamente proporcional al desplazamiento x que el resorte se ha estirado (figura 4b) o comprimido (figura 4 c) desde la posición de equilibrio. Fuerza ejercida por el resorte (ley de Hooke):

$$F=-kx \quad (7)$$

Note que la posición de equilibrio se eligió en $x=0$ y que el signo menos en la ecuación anterior indica que la fuerza restauradora tiene siempre sentido opuesto al desplazamiento x . Por ejemplo, si elegimos el sentido positivo hacia la derecha (figura 4b), x es positiva cuando el resorte está estirado; sin embargo, el sentido de la fuerza restauradora es hacia la izquierda (sentido negativo). Si el resorte está comprimido, x es negativa (hacia la izquierda); pero la fuerza F actúa hacia la derecha (figura 4c).

1.5 Características de las señales

Las características de las señales son:

1.5.1 Amplitud (A)

La amplitud del movimiento, es la magnitud máxima del desplazamiento con respecto al equilibrio; es decir, el valor máximo de $|x|$ y siempre es positiva. (Young et al., 209)

1.5.2 Periodo (T)

Es el tiempo necesario para un ciclo completo (una repetición completa del movimiento), la unidad del periodo en el Sistema Internacional es el segundo. (Halliday, Resnick, & Walker, 2001)

1.5.3 Frecuencia (F)

Es el número de ciclos completos por segundo. La frecuencia se especifica generalmente en Hertz (Hz), donde $1 \text{ Hz} = 1$ ciclo por segundo según la Ecuación 8. A partir de tales definiciones, es fácil ver que la frecuencia y el periodo están inversamente relacionados. (Giancoli, 1997)

$$F=1/T \text{ Y } T=1/F \quad (8)$$

1.5.4 Frecuencia angular (ω)

La frecuencia angular (ω) es 2 veces la frecuencia, representa la rapidez de cambio en una cantidad angular, que siempre se mide en radianes, de modo que sus unidades son rad/s. Ecuación 9 Puesto que la frecuencia esta en ciclos/s podemos considerar que el numero 2 tiene unidades de rad/s.(Young et al., 209AD)

$$\omega = 2\pi F = \frac{2\pi}{T} \quad (9)$$

1.6 Movimiento armónico simple (MAS)

El tipo de oscilación más sencillo sucede cuando la fuerza de restitución F_x es directamente proporcional al desplazamiento x con respecto al equilibrio. Esto ocurre si el resorte es ideal y obedece la ley de Hooke como se ve en la figura 5.

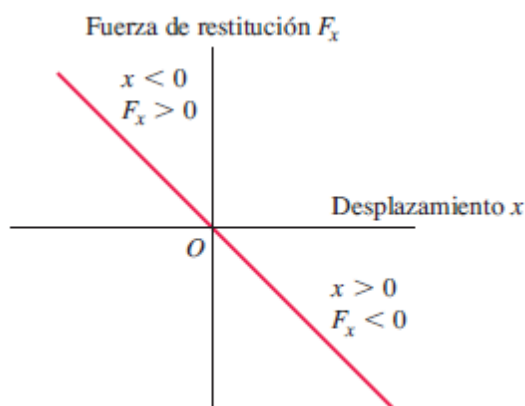


Figura 5.Movimiento Armónico Simple

Fuente:(Young et al., 209AD)

En ambos lados de la posición de equilibrio, F_x y x siempre tienen signos opuestos, la componente x de la fuerza que el resorte ejerce sobre el cuerpo es el negativo, la siguiente ecuación da la magnitud y el signo correcto de la fuerza, ya sea x positivo, negativo o cero, la constante de fuerza k siempre es positiva y tiene unidades de N/m, así que la componente x de la fuerza F_x sobre el cuerpo es, Ecuación 10 :

$$F_x = -kx \quad (10)$$

Si la fuerza de restitución es directamente proporcional al desplazamiento con respecto al equilibrio, según la ecuación de Hooke, la oscilación se denomina movimiento armónico simple, que se abrevia MAS.

La aceleración de un cuerpo en MAS está dada por la Ecuación 11:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_x}{m} = -\frac{k}{m}x \quad (11)$$

El signo menos indica que la aceleración y el desplazamiento siempre tienen signos opuestos.

La relación entre la fuerza de restitución y el desplazamiento es más complicada que la ecuación anterior. No obstante, en muchos sistemas, la fuerza de restitución es aproximadamente proporcional al desplazamiento si éste es lo suficiente pequeño. Es decir, si la amplitud es pequeña, las oscilaciones de tales sistemas son más o menos armónicas simples y, por lo tanto, la ecuación anterior las describe aproximadamente. Así, podemos usar el MAS como modelo aproximado de muchos movimientos periódicos distintos, como la vibración del cristal de cuarzo de un reloj de pulso, el movimiento de un diapasón, la corriente eléctrica en un circuito de corriente alterna, y las vibraciones de los átomos en moléculas y sólidos. (Young et al., 209AD)

Para explorar las propiedades del movimiento armónico simple, debemos expresar el desplazamiento x del cuerpo oscilante en función del tiempo, $x(t)$.

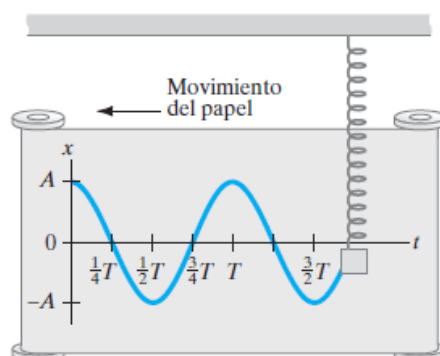


Figura 6. Propiedades del movimiento armónico simple

Fuente: (Young et al., 209AD)

Podríamos imaginar la forma de la solución notando que, si una pluma se uniera a una masa vibratoria, como se ve en la figura 6, y una hoja de papel se moviera a una tasa constante debajo de ella, la pluma trazaría la curva mostrada. La forma de esta curva parecería sinusoidal (como una curva seno o coseno) en función del tiempo y su altura es la amplitud A . Consideremos entonces que la solución general se escribe en la Ecuación 12:

$$x = A\cos(\omega t + \phi) \quad (12)$$

Sustituyendo en la Ecuación 14 del movimiento armónico simple tenemos la Ecuación 13 y Ecuación 14:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d(A\cos(\omega t + \phi))}{dt} = -A\omega\sin(\omega t + \phi) \quad (13)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2(A\cos(\omega t + \phi))}{dt^2} = \omega^2 A\cos(\omega t + \phi) \quad (14)$$

Ahora haciendo un arreglo tendríamos la Ecuación 15:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (15)$$

Sustituyendo en la Ecuación 15, obtenemos la Ecuación 18 y Ecuación 19:

$$-\omega^2 A\cos(\omega t + \phi) + \frac{k}{m}A\cos(\omega t + \phi) = 0 \quad (16)$$

$$\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)A\cos(\omega t + \phi) = 0 \quad (17)$$

Para satisfacer nuestra ecuación en cualquier tiempo (t) debemos igualar a la Ecuación 18:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (18)$$

Con la Ecuación 19 y Ecuación 20 obtenemos la frecuencia Natural:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (19)$$

$$F = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (20)$$

Vemos que la frecuencia y el periodo no dependen de la amplitud. Cambiar la amplitud de un oscilador armónico simple no afecta su frecuencia. Eso nos dice que cuanto mayor sea la masa, menor será la frecuencia; y que cuanto más rígido sea el resorte, mayor será la frecuencia. La frecuencia f a la cual oscila naturalmente un OAS se conoce como su frecuencia natural.(Young et al., 209AD)

1.6.1 Características de las señales

Si un muelle oscila libremente, siempre acaban parándose porque las fuerzas de rozamiento disipan su energía mecánica. Un movimiento con estas características se denominan movimiento amortiguado, como se ve en la figura 7, cuya ecuación diferencial es la Ecuación 21.

$$-kx = b \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (21)$$

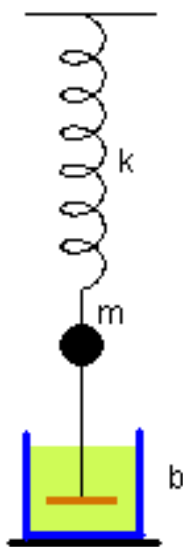


Figura 7. Movimiento amortiguado

Fuente: (Tipler & Mosca, 2004)

El movimiento sub amortiguamiento es aquel movimiento que es débil, de modo que la amplitud decrece lentamente con el tiempo.(Tipler & Mosca, 2004)

1.7 Movimiento sobre amortiguado

Es aquel amortiguamiento el cual es muy grande, el oscilador no ejecuta una oscilación completa, sino que se mueve a la posición de equilibrio con una velocidad que se aproxima a cero cuando el objeto se acerca a dicha posición de equilibrio.

1.8 Oscilaciones forzadas (resonancias)

Cuando un sistema oscilatorio se pone en movimiento, vibra con su frecuencia natural. Sin embargo, sobre el sistema puede actuar una fuerza externa, que tiene su propia frecuencia particular y así tenemos una oscilación forzada, cuya frecuencia es diferente de la frecuencia natural. (Giancoli, 1997)

En una oscilación forzada, la amplitud de vibración y, por consiguiente, la energía transferida al sistema oscilatorio, depende de la diferencia entre sí, así como de la cantidad de amortiguamiento, alcanzándose un máximo cuando la frecuencia de la fuerza externa es igual a la frecuencia natural del sistema, es decir, cuando. La amplitud puede volverse muy grande cuando la frecuencia impulsora está cerca de la frecuencia natural, en tanto que el amortiguamiento no sea muy grande. Cuando el amortiguamiento es pequeño, el incremento en amplitud cerca de es muy grande. Este efecto se conoce como resonancia. La frecuencia natural de un sistema se llama su frecuencia resonante.

1.9 Osciladores electrónicos

Un oscilador es un circuito que produce una oscilación propia de frecuencia, formada de onda y amplitud determinadas, según se conoce un sistema retroalimentado puede ser oscilante a causa de la inestabilidad. Aprovechando esta particularidad, que en otro contexto se considera desventajosa, y consideramos primeramente una estructura como la figura 8 que es estable y está en la configuración de la mayoría de los osciladores electrónicos. (Miyara, 2004)

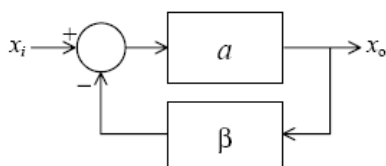


Figura 8. Esquema básico de retroalimentación para formar un oscilador

Fuente: (Miyara, 2004)

1.10 Especificaciones de la respuesta de un sistema en el dominio del tiempo

Para caracterizar la respuesta de un sistema lineal a una entrada escalón unitario se utilizan los siguientes criterios:

a) Sobre paso máximo. El sobre paso máximo se define como la máxima desviación de la salida con respecto a la entrada durante el estado transitorio. La magnitud máxima del sobrepaso se usa también como una medida de la estabilidad relativa del sistema. El sobrepaso máximo se suele representar como un porcentaje del valor final de la respuesta escalón unitario; esto es la Ecuación 22:

$$\%desobrepasomáximo = \frac{sobrepasomáximo}{valorfinal} \times 100 \quad (22)$$

b) Tiempo de retardo. El tiempo de retardo (T_d) se define como el tiempo que se necesita para que la respuesta a entrada escalón unitario alcance el 50% de su valor final.

c) Tiempo de subida. El tiempo de subida (T_r) se define como el tiempo necesario para que la respuesta a entrada escalón aumente desde el 10% hasta el 90% de su valor final. Algunas veces se usa una medida alternativa, que representa al tiempo de subida como el recíproco de la pendiente de la respuesta en el instante en que dicha respuesta es igual al 50% de su valor final.

d) Tiempo de asentamiento. El tiempo de asentamiento (T_s) se define como el tiempo necesario para que la respuesta al escalón unitario decrezca y quede dentro de un intervalo específico de porcentaje de su valor final. Una cifra muy utilizada es de 5%.

Estos cuatro criterios: sobrepaso máximo, tiempo de retardo (T_d), tiempo de subida (T_r) y tiempo de asentamiento (T_s), se muestran en la figura 9.

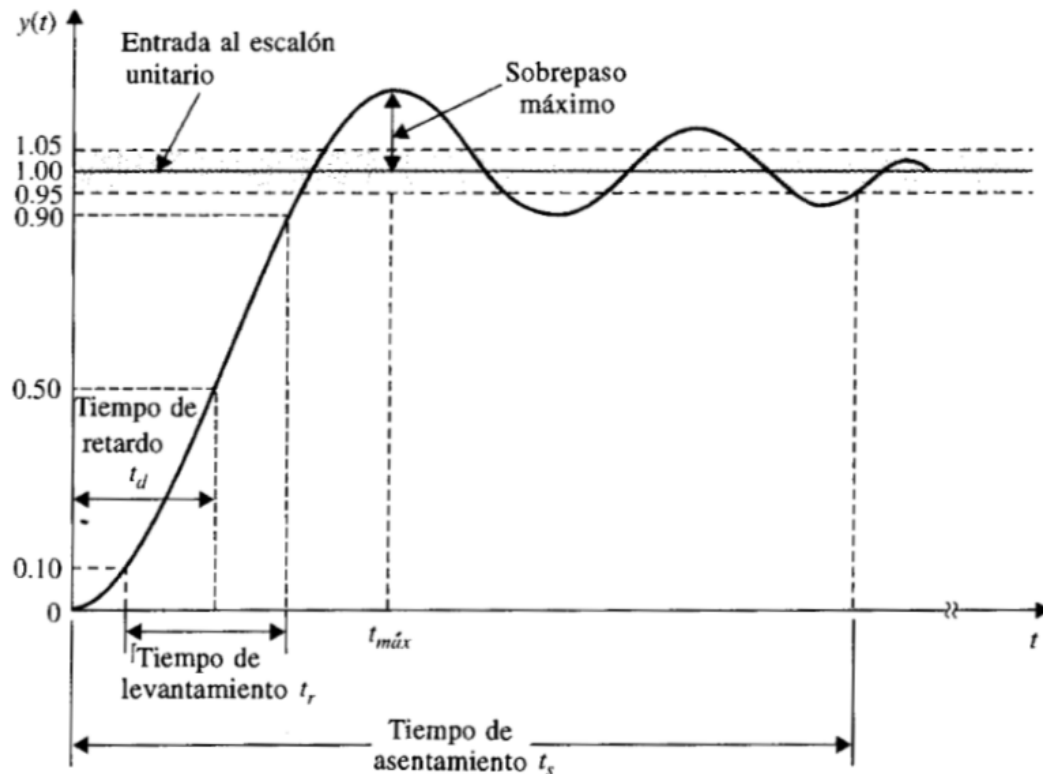


Figura 9. Criterios de la respuesta de sistemas lineales

Fuente:(Kuo, 1996).

Estas cuatro cantidades proporcionan una medida directa de las características transitoria de la respuesta escalón unitario. Estos parámetros son de fácil medición cuando ya se cuenta con la gráfica de la respuesta.(Kuo, 1996)

1.11 Identificadores lineales

Se denomina identificación a la técnica de construir un modelo a partir de las variables medidas del proceso: entradas o variables de control, salidas o variables controladas y, posiblemente, perturbaciones. En principio y con el objetivo de modelizar se pueden proponer tres formas distintas de utilizar los métodos de identificación:

- Hacer distintas aproximaciones para estructurar el problema: seleccionar las señales de interés, observar la dependencia entre ellas, estudiar el grado de linealidad del proceso.

- Construir un modelo que describa el comportamiento entre las entradas y las salidas, prescindiendo del comportamiento físico. Hay distintas formas de abordar el problema, según se consideren modelos no paramétricos o modelos paramétricos.
- Utilizar los datos para determinar los parámetros no conocidos del modelo físico obtenido a base del estudio de propiedades y leyes físicas del proceso estudiado. En este caso se habla de modelos “tailor-made” de los cuales se debe estimar solamente los valores de los parámetros no conocidos. Para ello se recurre a ensayos de comportamiento o pruebas físicas y/o a la utilización de técnicas de optimización. (Identificaci, 1994)

1.11.1 Estructura del modelo

Partiendo de la base de que para modelizar un proceso necesitamos los datos observados, en el caso de un sistema dinámico con una entrada en el instante t denominada como $u(t)$ y una salida en el instante t denominada como $y(t)$ los datos serán una colección finita de observaciones, Ecuación 23:

$$Z = \{u(0), y(0), u(1), y(1), \dots, u(N), y(N)\} \quad (23)$$

El problema de los métodos de identificación consiste en encontrar relaciones matemáticas entre las secuencias de entrada y las secuencias de salida. O también, si definimos las observaciones de forma más general Ecuación 24:

$$Z^n = \{[y(t), \varphi(t)]; t = 1, \dots, N\} \quad (24)$$

Lo se busca es como determinar $y(N+1)$ a partir de $\varphi(N+1)$. En el caso de un sistema dinámico, $\varphi(t)$ contendría la información de las entradas y salida anteriores a t .

El problema matemático que se formula es la construcción de una función $g_n(t, \varphi(t))$ tal que a partir de ella podamos determinar $y(t)$, Ecuación 25:

$$y(t) = g_N(t, \varphi(t)) \quad (25)$$

En general se busca una función g que sea parametrizable, es decir que tenga un número finito de parámetros. A estos parámetros se les denomina con θ . A toda la familia funciones candidatas se las denomina estructura del modelo, y en general estas funciones se escriben como $g_N(t, \theta, \varphi(t))$. Esta función permite calcular el valor $y(t)$, Ecuación 26:

$$y(t) \approx g_N(t, \theta, \varphi(t)) \quad (26)$$

Por ejemplo en el caso de una estructura de modelo simple como ARX de primer orden, Ecuación 27:

$$y(t) + ay(t - 1) = b_1u(t - 1) + b_2u(t - 2) \quad (27)$$

La correspondencia con formulación general son la Ecuación 28, Ecuación 29 y Ecuación 30.

$$\theta = (a, b_1, b_2) \quad (28)$$

$$\varphi(t) = \quad (29)$$

$$g(t, \theta, \varphi(t)) = -ay(t - a) + b_1u(t - a) + b_2u(t - 2) \quad (30)$$

El ejemplo anterior muestra la formulación convencional de los sistemas de identificación, en que la estructura del modelo se corresponde con una regresión lineal. En general, la estructura del modelo podría ser cualquiera, desde regresiones no lineales (caso en que g es no lineal respecto a θ), modelos tipo ‘tailor-made’, a redes neuronales. También podrían incluirse modelos dinámicos Fuzzy en el caso en que se reemplazara $\varphi(t)$ y $y(t)$ por valores como “el horno está muy caliente”, “el horno está tibio”, “el agua está hirviendo”. (Identificaci, 1994)

1.11.2 Etapas para la identificación de modelos lineales

La figura 10 muestra las etapas a seguir para identificar un modelo paramétrico siendo:

Diseño del experimento de identificación. En esta primera etapa es necesario decidir, entre otros aspectos: el tipo de señales de excitación, el mejor periodo para la adquisición de datos, la cantidad de datos necesarios.

Observación y mejora de la calidad de los datos capturados. Antes de utilizar los métodos de estimación de parámetros es necesario: observar y reparar los datos erróneos, filtrar las altas frecuencias, eliminar offsets y tendencias.

Determinación de la estructura del modelo. En esta etapa es necesario definir el tipos de modelos a utilizar: continuos o discretos, tipos de ruido, lineales o no lineales, regresiones, redes neuronales. Y es necesario adoptar un procedimiento para determinar el orden del modelo.

Estimación de los parámetros. Etapa la mayoría de las veces muy relacionada con la anterior, en ella se presenta el problema de decidir el método o métodos de estimación de parámetros que se va a utilizar para calcular el valor de los mismos. En general se

puede escoger entre dos técnicas distintas: en el dominio temporal y en el dominio de la frecuencia.

Validación del modelo. Es la etapa en la que debe preguntarse si el modelo identificado es suficientemente representativo del proceso estudiado. En él se debe definir un criterio para evaluar la calidad. Generalmente se dispone de varios modelos candidatos y debe escogerse uno de ellos basándose en algún criterio.

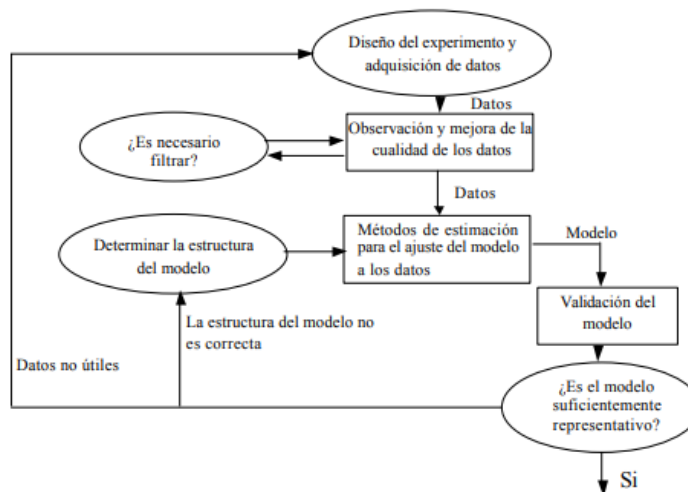


Figura 10. Criterios de estimación

Fuente: (Identificaci, 1994).

Actualmente hay muchos programas comerciales de ayuda a ingeniero en las etapas de identificación, concretamente en las etapas de estimación de parámetros y evaluación de las propiedades del modelo estimado. Hay otras etapas que dependen exclusivamente del usuario (Identificaci, 1994).

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Planteamiento del problema

Actualmente, el mundo se encuentra en un periodo de crisis energética, ya que, dentro de algunos años, la producción mundial de petróleo convencional empezará a disminuir, al haber alcanzado actualmente el límite de producción. Mientras tanto, la demanda mundial no deja de aumentar.

Existen alternativas energéticas como el gas natural, el carbón, la fusión y fisión nuclear, energías renovables como la hidroeléctrico solar eólica, mareo motriz geotérmica, y el hidrógeno.

Una forma de producción de hidrógeno es mediante la electrolisis, pero la eficiencia de esta es del 50%.

En este contexto se plantea las siguientes preguntas de investigación

2.1.1 Problema general

¿La utilización de señales de frecuencia conseguirán la mejora en la eficiencia de la producción de hidrógeno?

2.1.2 Problemas específicos

¿Cuál es el mejor diseño de un sistema electrónico que permitirá un amperaje correcto aplicado a la generación de hidrógeno?

¿Cuáles serán las señales correctas en frecuencia y amplitud que conseguirán la mejora de la producción de hidrógeno?

¿Cuál es la expresión matemática que relaciona la generación de hidrógeno con señal electrónica?

2.2 Hipótesis

2.2.1 Hipótesis general

Las señales de frecuencia mejoran la eficiencia de la producción de hidrógeno.

2.2.2 Hipótesis específicas

- El mejor diseño de un sistema electrónico que permitirá un amperaje correcto aplicado a una celda seca en la generación de hidrógeno está en la utilización de Mosfet y generados de frecuencia usando osciladores analógicos.
- Las señales correctas en frecuencia y amplitud que conseguirán la mejora de la producción de hidrógeno serán las cuadradas y las frecuencias estarán comprendidas entre 10 y 15Khz.
- La expresión matemática que relacione la generación de hidrógeno con señal electrónica será una ecuación diferencial de alto grado.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Emplear señales electrónicas en diferentes frecuencias y formas para la mejora la eficiencia de la producción de hidrógeno.

2.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema electrónico para la generación de señales electrónicas aplicadas a la generación de hidrógeno.
- Determinar el tipo de señal y frecuencia que mejorará la eficiencia de producción de hidrógeno.
- Determinar la expresión matemática que relacione la generación de hidrógeno con la señal electrónica que mejorará la eficiencia en la producción



CAPITULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ámbito o lugar de estudio

La investigación se desarrolló en los laboratorios de la carrera profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional del Altiplano en Puno Perú.

3.2 Población y muestra

La muestra será igual a la población debido a que el número de experimentos fue menor a 50.

3.3 Materiales

Se utilizaron los siguientes materiales:

01 Osciloscopio digital Tektronic TBS 1102-B-EDU

01 Generador de funciones Tektronic AFG1062

01 Fuente de alimentación Keithley 2231A-30-3 TRIPLE CHANEL DC POWER
SUPPLY

01 celda de hidrógeno de elaboración propia

01 etapa de potencia electrónica

01 etapa de preamplificación

01 Sensor de hidrógeno MQ-8

3.4 Metodología

3.4.1 Metodologías para el primer objetivo específico

El primer objetivo específico es Diseñar el sistema electrónico para la generación de señales electrónicas aplicado a la generación de hidrógeno, para realizar este diseño se toma en cuenta, el diseño basado en el método propuesto en (Fernández & Mora, 2010) donde se establece los siguientes pasos: establecer la condición de diseño, creación de esquemáticos, simulación electrónica, montaje y prueba, según los siguientes pasos:

- a) Implementación de la celda de generación de hidrógeno
- b) Se diseña, simula y construye circuito de potencia electrónica para la celda de generación de hidrógeno.
- c) Las variables medias son las corrientes y voltajes del circuito de potencia electrónica.

A continuación, se desarrollan cada uno de los pasos

3.4.1.1 Implementación de la celda de generación de hidrógeno

El proceso está conformado por una celda para la generación de hidrógeno, la cual obtiene el hidrógeno mediante la electrolisis, la electrolisis es un método para separar hidrógeno existente en el agua, esta fase está desarrollada por (Romero, 2018)

En la figura 11, se muestra la celda construida, similar a la desarrollada por (Romero, 2018), con el siguiente procedimiento corte de las láminas para la construcción de la celda de hidrógeno en metal de acero inoxidable, las fotos del sistema implementado se muestran en el anexo 2.



Figura 11. Celda de hidrógeno fabrica

3.4.1.2 Circuito electrónico para la celda de hidrógeno

El sistema electrónico para la celda de generación de hidrógeno está compuesto por dos etapas, la etapa adaptación de señales y la parte de electrónica de potencia.

a) Etapa de adaptación de señales

La etapa de adaptación de señales está compuesta por un amplificador operacional en su modo no inversor que se observa en la figura 12.

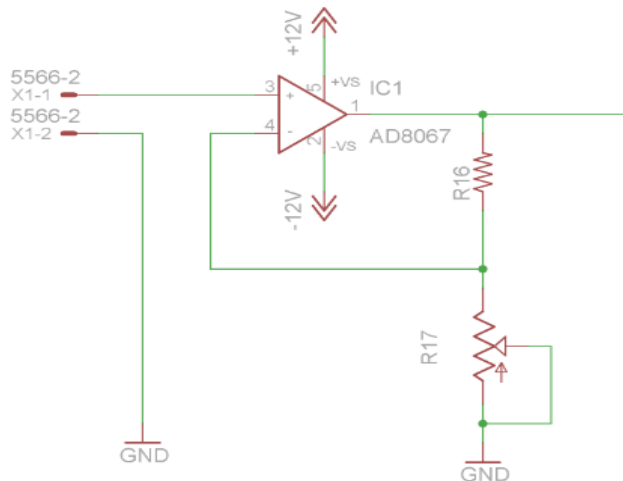


Figura 12. Amplificador operacional modo no inversor

El cual fue calculado usando la Ecuación 31.

$$i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{0 - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_f} \quad (31)$$

Pero $v_1 = v_2 = v_i$, con lo que la Ecuación 31, se reescribe como la Ecuación 32:

$$-\frac{v_i}{R_1} = \frac{v_i - v_o}{R_f} \quad (32)$$

Despejando la Ecuación 32, se obtiene la Ecuación 33

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_i \quad (33)$$

Donde la ganancia que se necesita para la etapa de adaptación de señales es 1, con lo cual establecemos los valores de $R_f = 100K$ y $R_1 = 100K$, para tener una ganancia que varíe sea igual a 1.

Etapa electrónica de potencia de la celda de hidrógeno

La etapa de potencia del circuito electrónico fue diseñada para proporcionar alta corriente, para lo cual se utilizará un amplificador de potencia transistorizado, basado la configuración del amplificador clase A- B, como se muestra en la figura 13

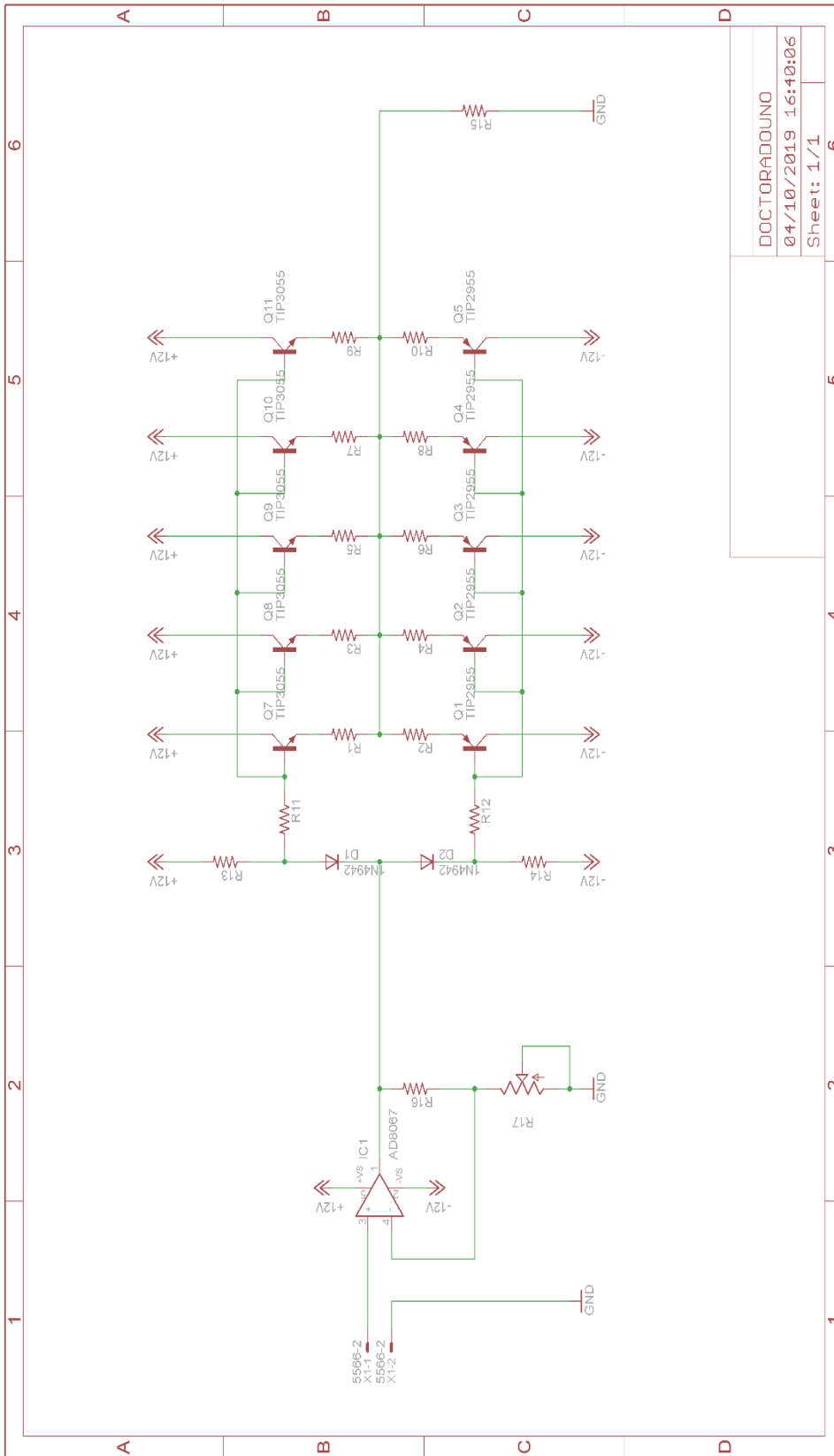


Figura 13. Diagrama circuital de la etapa de adaptación y potencia para la celda de generación de hidrógeno

Se planteó los siguientes requerimientos de diseño tomando en cuenta los datos obtenidos de la medición:

- La resistencia la carga, es decir la resistencia eléctrica de la celda de hidrógeno fue $R_L=1.5K$.
- El voltaje que se aplicó a la celda de hidrógeno es de 5V.

Se calcularon los valores de las bases de los transistores del circuito, según la figura 14, los cuales se encargaron de polarizar los transistores de potencia:



Figura 14. Red de polarización de transistores de potencia

Se planteo la corriente de polarización $I_p=0.1A$, para lo cual planteamos la ecuación de nodos, Ecuación 34.

$$V_+ + V_- - V_{D1} - V_{D2} - V_{R14} - V_{R13} = 0 \quad (34)$$

Donde:

$$V_+=12; V_-=12; V_{D1}=0.7; V_{D2}=0.7;$$

Con una corriente $I_p=0.1A$, se obtiene la Ecuación 35 y Ecuación 36.

$$V_{R13}=I_p \cdot R_{13}=0.1 \cdot R_{13} \quad (35)$$

$$VR_{14} = I_p * R_{14} = 0.1 * R_{14} \quad (36)$$

Remplazando los valores y las Ecuaciones 34 y 35 en la Ecuación 36 se obtuvo la Ecuación 37.

$$12_+ + 12 - 0.7 - 0.7 - 0.1 * R_{14} - 0.1 * R_{13} = 0 \quad (37)$$

Despejando la Ecuación 37 se obtuvo la Ecuación 38

$$R_{13} + R_{14} = \frac{22.6}{0.113} = 226\Omega \quad (38)$$

De la Ecuación 38, se asignó los valores de $R_{13} = R_{14} = 100\Omega$.

Con una entrada de 5V, y tomamos la siguiente parte del circuito mostrada en la figura 15, se calculó la corriente de colector de la configuración AB de los transistores

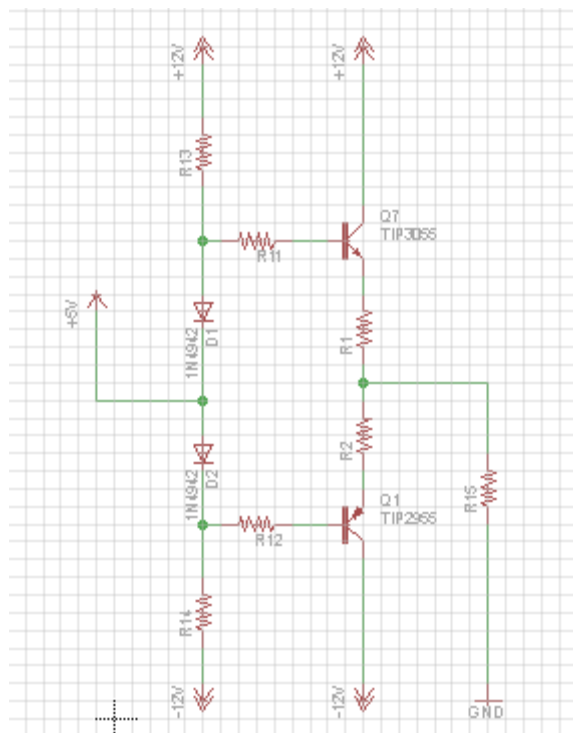


Figura 15. Amplificador de potencia

El voltaje en la resistencia R_{15} , es decir $VR_{15} = 5V$, y la $R_{15} = 1.5K$, con lo que se obtuvo la corriente de la celda de hidrógeno según la Ecuación 39

$$I_h = \frac{5}{1.5K} = 3.33\text{mA} \quad (39)$$

Se establece por diseño la corriente de colector $I_c=0.17\text{A}$, planteamos la Ecuación 40 de nodos según la figura 17

$$5.7 - \frac{I_c}{100} * R_{11} - 0.7 - I_c * R_1 - (1.5K * 0.03333) = 0 \quad (40)$$

Desarrollando la Ecuación 40, se obtuvo la Ecuación 41.

$$I_c * \left(\frac{R_{11}}{100} + R_1 \right) = 0.1 \quad (41)$$

Donde se estableció la $I_c=0.1\text{A}$, obtenemos la Ecuación 42:

$$\left(\frac{R_{11}}{100} + R_1 \right) = \frac{0.1}{0.17} = 0.588 \quad (42)$$

Estableciendo $R_{11}=3.3\Omega$ con lo que se obtiene el valor de R_1 , según la Ecuación 43:

$$R_1 = 0.588 - 0.33 = 0.555\Omega \quad (43)$$

Por último la corriente de $I_c=0.1$ fue dividida en las cinco etapas del circuito de potencia por lo que $I_{c1}= I_{c2}= I_{c3}= I_{c4}= I_{c5}=I_c=0.1$.

3.4.1.3 Etapa de sensado del hidrógeno

Para realizar la medición de hidrógeno se utilizó el sensor de gas hidrógeno que se muestra en el figura 16 modelo MQ-8, construido a base de óxido de estaño (SnO_2), el cual posee una baja conductividad con aire limpio. Cuando el gas hidrógeno está presente, la conductividad del sensor tiende a elevarse.



Figura 16. Sensor de Hidrógeno MQ-8

Fuente: Hoja de datos MQ-8

Se puede cambiar la conductividad para la salida correspondiente de la concentración del gas hidrógeno usando un simple circuito que se muestra en la figura 17, así mismo tiene una anti interferencia a otros gases. Este sensor puede detectar hidrógeno, siendo un sensor de bajo costo y muchas aplicaciones, la hoja de datos del sensor se encuentra en el anexo 1.

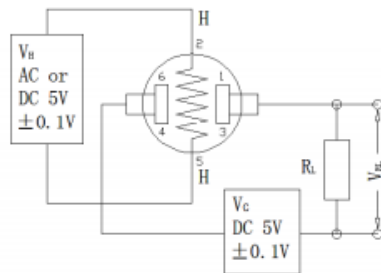


Figura 17. Circuito de conexión del sensor MQ-8

Fuente: Hoja de datos MQ-8

En la figura 18 se muestra el módulo MQ-8 de arduino sensible al gas de hidrógeno en el aire el cual es adecuado para nuestra celda de generación de hidrógeno.

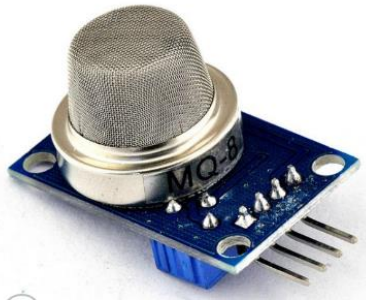


Figura 18. Módulo de arduino MQ-8

Fuente: Hoja de datos MQ-8

El tamaño de este módulo es de 32mm x 22mm x 27 mm, módulo construido en base al LM393 y el sensor de gas hidrógeno ZYMQ-8, el voltaje de funcionamiento es de DC5V, con una salida de nivel TTL analógica, con una buena sensibilidad al hidrógeno, no siendo sensible al vapor de etanol, hollín, monóxido de carbono y otros gases.

Finalmente, el diagrama de bloques sistema para determinar la señal y frecuencia que produzca la mayor cantidad de hidrógeno se muestra en la figura 19:



Figura 19. Diagrama de bloques de la celda de hidrógeno y la etapa electrónica

3.4.2 Metodología para el segundo objetivo específico

El segundo objetivo específico fue determinar el tipo de señal y frecuencia que mejorará la eficiencia de producción de hidrógeno para lo cual se plantearon cuatro experimentos, para poder extraer las características de la respuesta de la producción de hidrógeno, comparara las señales y determinar cuál es la que mejoro la producción de hidrógeno se utilizó el denominado desempeño de sistemas en el domino de tiempo – Respuesta transitoria, (Kuo, 1996) en la cual se indica que existen cuatro criterios respecto a la respuesta de sistemas: a) Sobrepaso máximo, b) tiempo de retardo, c) tiempo de subida, d) tiempo de asentamiento. A continuación, detallamos los experimentos, el código fuentes para la caracterización de señales se encuentra en el anexo 3.

3.4.2.1 Primer experimento

Medición de la producción de hidrógeno con una señal de entrada de voltaje continuo fijada en 5V.

3.4.2.2 Segundo experimento

Medición de la producción de hidrógeno con una señal de entrada voltaje senoidal, de amplitud de 5V, con un rango de frecuencia que varían desde 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1KHz, 5KHz, 10KHz, 50KHz, 100KHz, 500KHz y 1MHz.

3.4.2.3 Tercer experimento

Medición de la producción de hidrógeno con una señal de entrada voltaje cuadrada, de amplitud de 5V, con un rango de frecuencia que varían desde

10Hz, 100Hz, 500Hz, 1KHz, 5KHz, 10KHz, 50KHz, 100KHz, 500KHz y 1MHz.

3.4.2.4 Cuarto experimento

Medición de la producción de hidrógeno con una señal de entrada voltaje rampa de amplitud de 5V, con una rango de frecuencia que varían desde 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1KHz, 5KHz, 10KHz, 50KHz, 100KHz, 500KHz y 1MHz.

3.4.3 Metodología para el tercer objetivo específico

La determinación de la expresión matemática está basado en el método propuesto en (Identificaci, 1994) donde se establece los modelos de regresión ARX, utilizando la etapas a seguir para la identificación de un modelo, el código fuente para estimación de señales se encuentran anexo 4.

Se realizaron cuatro estimaciones para determinar la expresión matemática basados en los datos de entrada y salida mostrados en la figura 20.

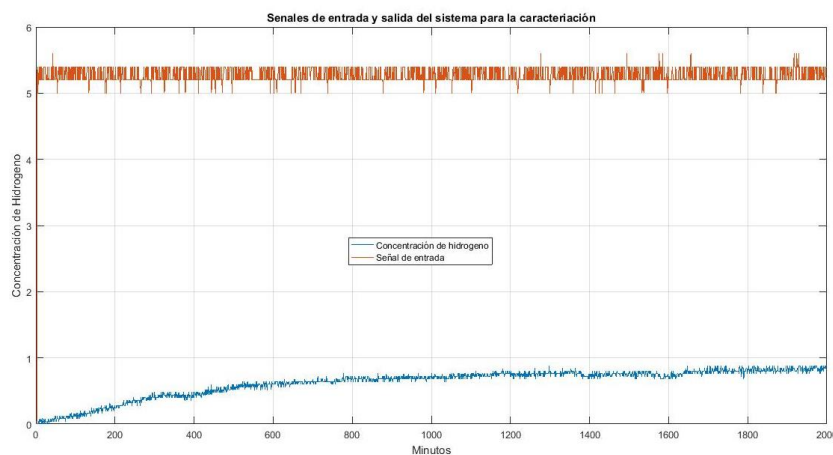


Figura 20. Señales de entrada y salida de la celda de generación de hidrógeno

3.4.3.1 Primera estimación

En la primera estimación se tomó en cuenta la función de variable compleja de primer orden dado por la Ecuación 44.

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K}{T_1s + 1} \quad (44)$$

Donde

K: Es la ganancia del sistema

Ti: Es el polo del sistema

s: Variable compleja

H(s): Señal de hidrógeno (entrada) en el espacio de variable compleja

V(s): Señal de voltaje (salida), en el espacio de variable compleja.

Utilizando estimadores lineales, con un periodo de muestreo de 0.2s, se establecieron los valores de K y Ti, la figura 21 muestra la respuesta del estimador.

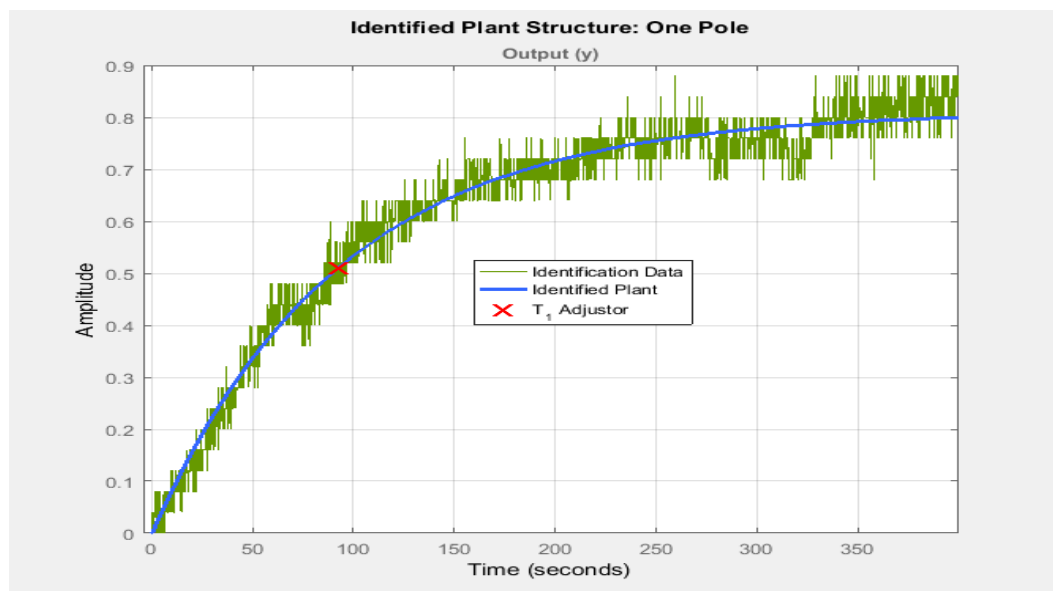


Figura 21. Respuesta del estimador para una función de primer orden

Se obtuvieron los valores de K= 0.15355 para la ganancia y un valor Ti=92.666 para el polo, del sistema reemplazando estos valores en la Ecuación 42 obtenemos la Ecuación 44.

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{0.15355}{92.666s + 1} \quad (45)$$

La Ecuación 43, será utilizada en el capítulo 4 de la tesis para la obtención de los resultados y establecer la mejor representación matemática del sistema.

3.4.3.2 Segunda estimación

En la segunda estimación se tomó en cuenta la función de variable compleja de primer orden dado por la Ecuación 46.

$$\frac{H(s)}{V(s)} = K \frac{T_z s + 1}{T_i s + 1} \quad (46)$$

Donde

K: Es la ganancia del sistema

T_i: Es el polo del sistema

T_z: Es el cero del sistema

s: Variable compleja

H(s): Señal de hidrógeno (entrada) en el espacio de variable compleja

V(s): Señal de voltaje (salida), en el espacio de variable compleja.

Utilizando estimadores lineales y para un periodo de muestreo de 0.2s, se establecen los valores de K, T_i y T_z la figura 22 muestra la respuesta del estimador.

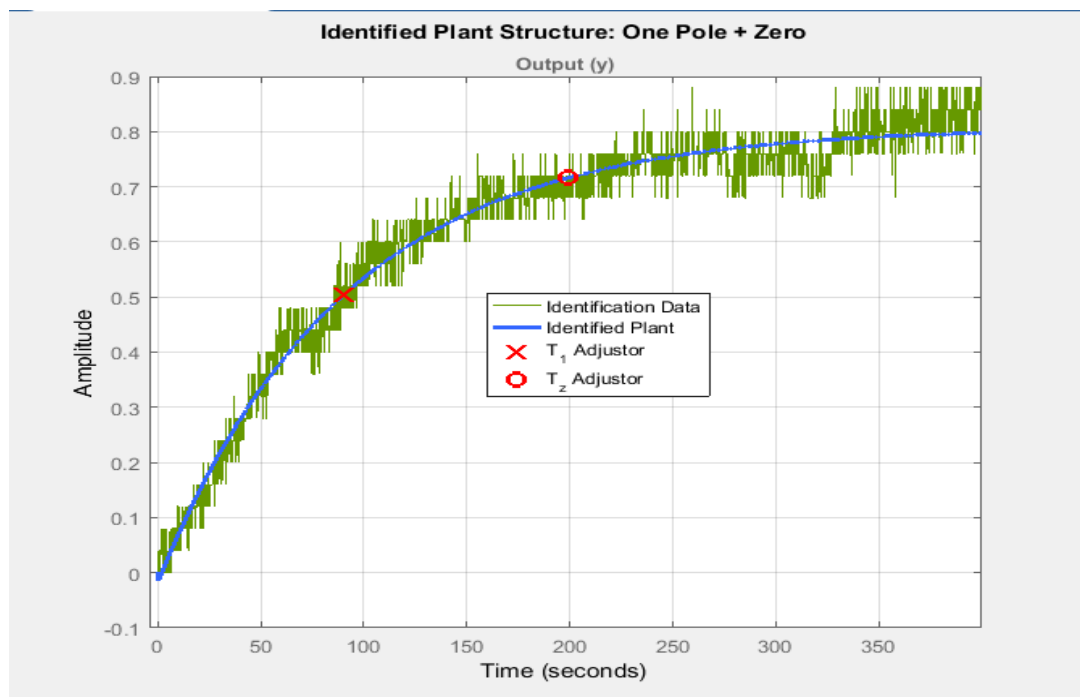


Figura 22. Respuesta del estimador para una función de primer orden con un cero

Obteniendo los valores de $K= 0.15299$ para la ganancia, un valor $T_i= 90.122$ para el polo del sistema y un valor $T_z= -1.6179$ para el cero, reemplazando estos valores en la Ecuación 44 obtenemos la Ecuación 47.

$$\frac{H(s)}{V(s)} = 0.15299 \frac{-1.6179s + 1}{90.122s + 1} \quad (47)$$

La Ecuación 45, será utilizada en el capítulo 4 de la tesis para la obtención de los resultados y establecer la mejor representación matemática del sistema.

3.4.3.3 Tercera estimación

En la tercera estimación se tomó en cuenta la función de variable compleja de segundo orden dado por la Ecuación 48

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K}{(T_w)^2 s^2 + 2\epsilon T_w s + 1} \quad (48)$$

Donde

K : Es la ganancia del sistema

T_w : Periodo natural no amortiguado

ϵ : Factor de amortiguamiento relativo

s : Variable compleja

$H(s)$: Señal de hidrógeno (entrada) en el espacio de variable compleja

$V(s)$: Señal de voltaje (salida), en el espacio de variable compleja.

Utilizando estimadores lineales y para un periodo de muestreo de $0.2s$, se establecen los valores de K , ϵ y T_w la figura 23 muestra la respuesta del estimador.

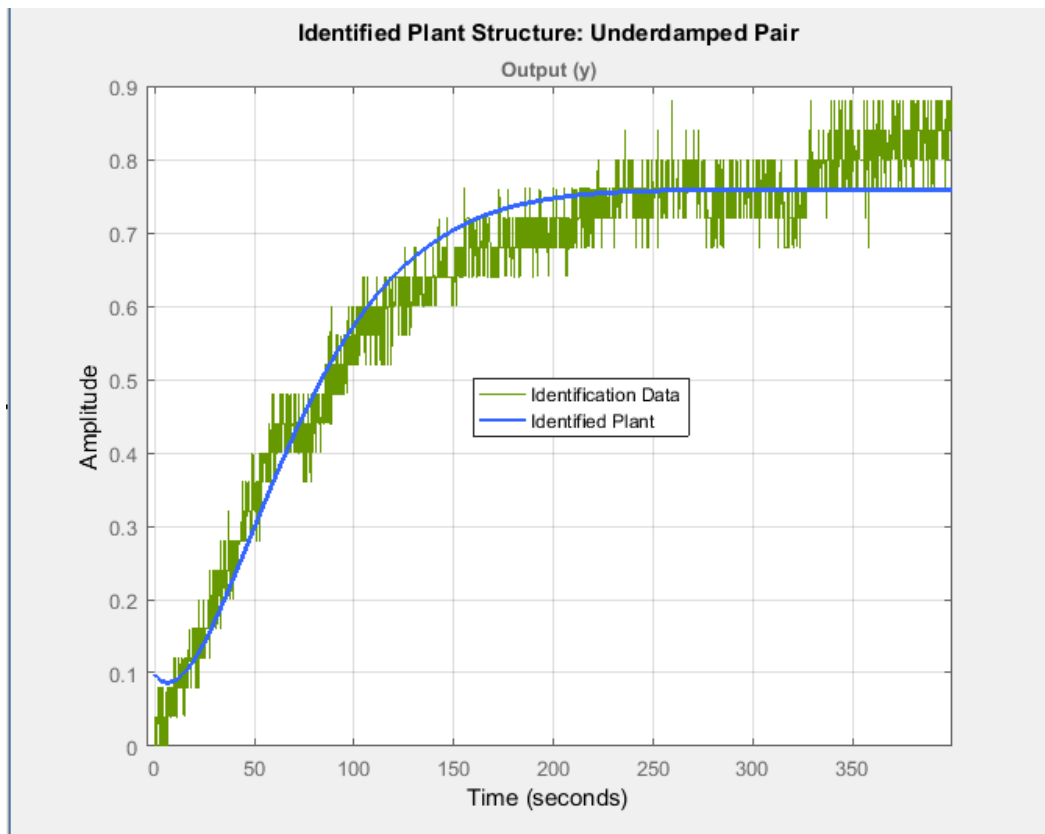


Figura 23. Respuesta del estimador para una función de segundo orden.

Obteniendo los valores de $K=0.01436$ para la ganancia, un valor $T_w=39.604$ para el periodo natural no amortiguado y un valor $\varepsilon=0.9$ para el factor de amortiguamiento relativo, reemplazando estos valores en la Ecuación 49 obtenemos la Ecuación 48.

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{0.1436}{1.5685e + 03s^2 + 71.2872s + 1} \quad (49)$$

La Ecuación 48, será utilizada en el capítulo 4 de la tesis para la obtención de los resultados y establecer la mejor representación matemática del sistema.

3.4.3.4 Cuarta estimación

En la cuarta estimación se tomó en cuenta la función de variable compleja de segundo orden dada por la Ecuación 50.

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K(T_z + 1)}{(T_w)^2 s^2 + 2\varepsilon T_w s + 1} \quad (50)$$

Donde

K: Es la ganancia del sistema

Tz: Cero del sistema

Tw: Periodo natural no amortiguado

ϵ : Factor de amortiguamiento relativo

s: Variable compleja

H(s): Señal de hidrógeno (entrada) en el espacio de variable compleja

V(s): Señal de voltaje (salida), en el espacio de variable compleja.

Utilizando estimadores lineales y para una periodo de muestreo de 0.2s, se establecen los valores de K, ϵ , Tz y Tw la figura 24 muestra la respuesta del estimador.

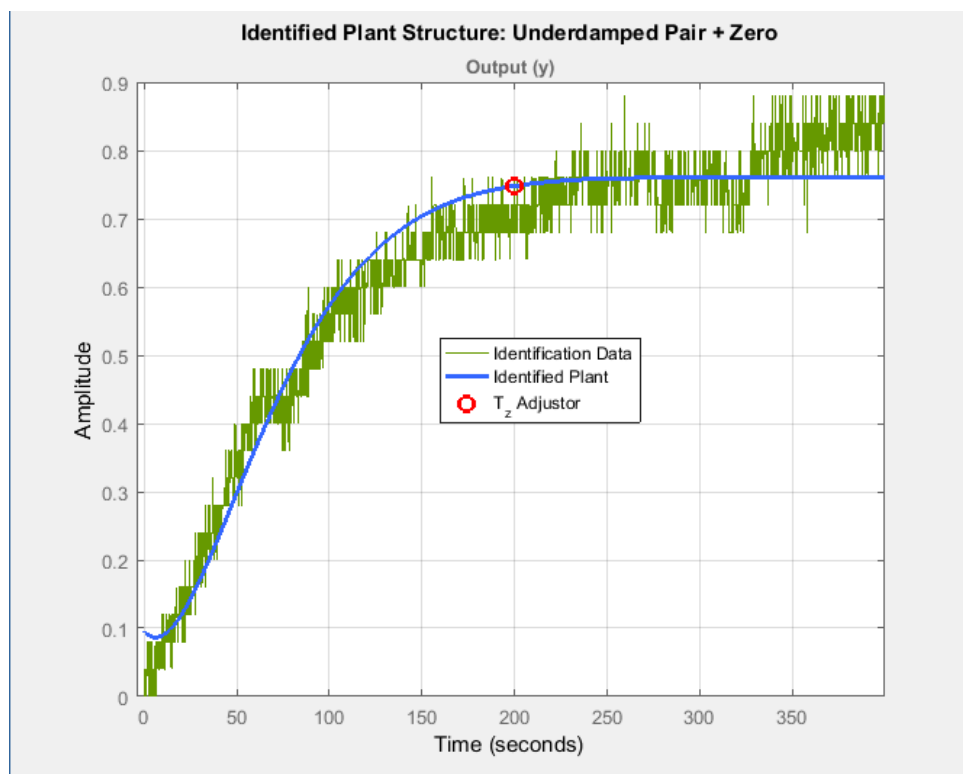


Figura 24. Respuesta del estimador para una función de segundo orden un polo.

Obteniendo los valores de $K= 0.14392$ para la ganancia, un valor $T_w= 40.027$ para el periodo natural no amortiguado, un valor $\varepsilon= 0.9$ para el factor de amortiguamiento relativo y valor $T_z=0.021803$ para el cero, remplazando estos valores en la Ecuación 40 obtenemos la Ecuación 51:

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K(0.021803 + s)}{1.6022e + 72.0486s^2 + s + 1} \quad (51)$$

La Ecuación 41, será utilizada en el capítulo 4 de la tesis para la obtención de los resultados y establecer la mejor representación matemática del sistema.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del primer objetivo específico

Para la obtención de los resultados de la etapa de potencia, se comparó entre las simulaciones, medición y cálculos realizados para el diseño.

4.1.1 Resultados de la simulación

La simulación fue realizada en el programa Proteus 7 profesional, donde se obtuvieron los siguientes resultados como se observa en la tabla 2

Tabla 2

Valores calculados y simulados del circuito de potencia

	Corriente de polarización de base de los transistores I_p	Corriente de la celda de hidrógeno I_h	Voltaje de la celda de hidrógeno VR15	Corriente de Colector I_c	Corriente de Colector I_{c1}	Corriente de Colector I_{c2}	Corriente de Colector I_{c3}	Corriente de Colector I_{c4}	Corriente de Colector I_{c5}
Valores calculados	0.10A	0.0033A	5.00V	0.17A	0.17A	0.17A	0.17A	0.17A	0.17A
Valores simulados	0.14A	0.0033A	4.99V	0.1A	0.1A	0.1A	0.1A	0.1A	0.1A
Error	0.04	0	0.01	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07

En la figura 25 se muestra los resultados obtenidos en Proteus que son cercanos a los esperados

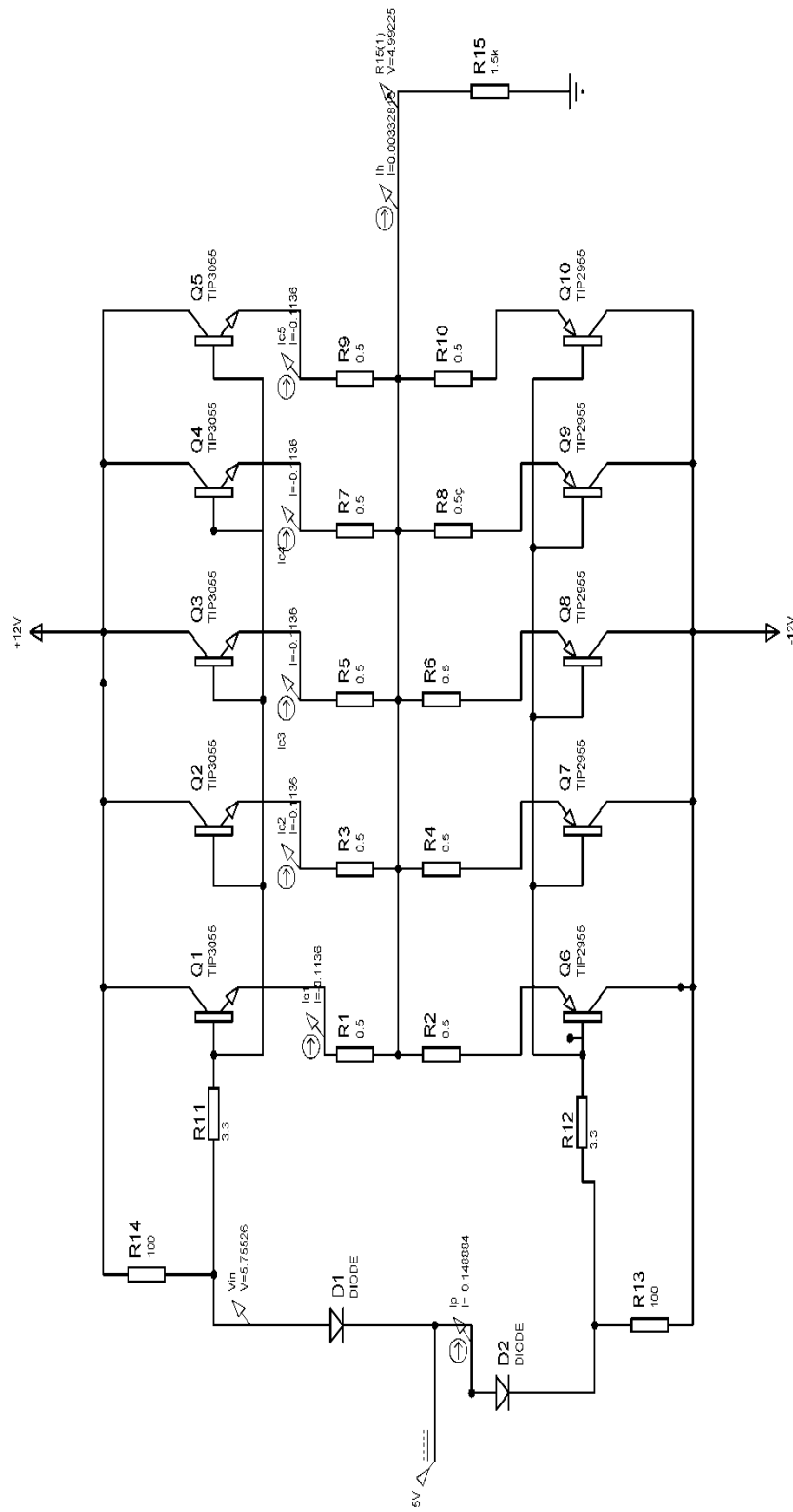


Figura 25. Diagrama circuital de simulación

4.1.2 Resultados de la medición del circuito

Los resultados de las mediciones realizadas en el circuito se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados obtenidos de la medición de circuito de potencia

	Corriente de polarización de base de los transistores I_p	Corriente de la celda de hidrógeno I_h	Voltaje de la celda de hidrógeno VR15	Corriente de Colector I_c	Corriente de Colector I_{c_1}	Corriente de Colector I_{c_2}	Corriente de Colector I_{c_3}	Corriente de Colector I_{c_4}	Corriente de Colector I_{c_5}
Valores calculados	0.10A	0.0033A	5.00V	0.17A	0.17A	0.17A	0.17A	0.17A	0.7A
Valores medidos	0.13A	0.0031A	4.9V	0.16A	0.16A	0.16A	0.16A	0.16A	0.16A
Error	0.04	0.002	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

4.1.3 Discusión del primer objetivo específico

En la tabla 2, se observa el error entre el sistema diseñado y el sistema simulado, el error en la corriente de polarización I_p es de 0.04A, el error entre los cálculos y la simulación de la corriente que usa la celda de hidrógeno es de 0.0002A y los errores entre los valores del diseño y los simulados de las corrientes de colector de los transistores es de 0.07A.

En la tabla 3, se observa el error entre el sistema diseñado y el sistema medido, el error en la corriente de polarización I_p es de 0.03A, el error entre los cálculos y la simulación de la corriente que usa la celda de hidrógeno es de 0.0002A y los errores entre los valores del diseño y los simulados de las corrientes de colector de los transistores es de 0.01A.

4.2 Resultados del segundo objetivo específico

Medición de la producción de hidrógeno con un señal de entrada de señal senoidal con una amplitud de 5V, con frecuencias fijadas en 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50Khz, 100kHz y 1MHz, se presentan a continuación:

4.2.1 Resultados del primer experimento

En la figura 26, se muestra la medición de la producción de hidrógeno con una señal de entrada de voltaje continua fijada en 5V.

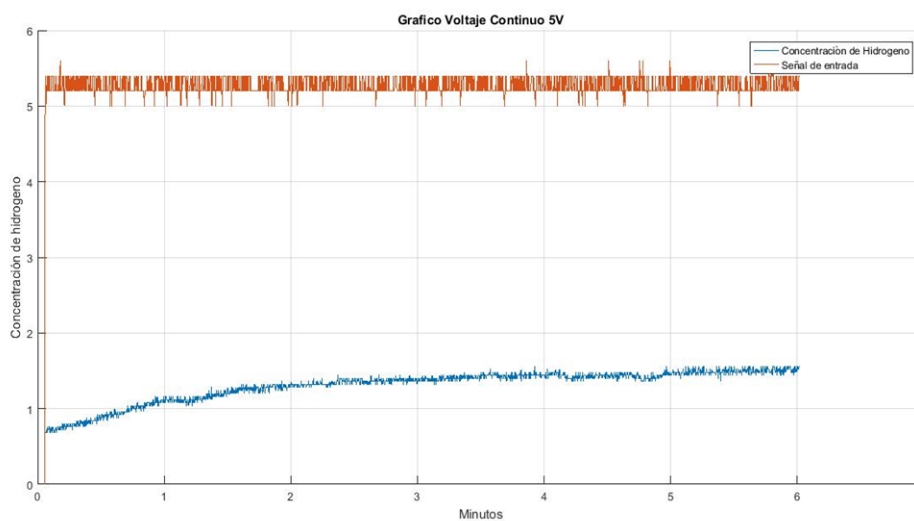


Figura 26. Señal de entrada 5V, señal de salida de Hidrógeno.

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en el 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 4.

Tabla 4

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada de 5v, continua.

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.25$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.33$; $t_{r90}=5.94$ $t_r=5.61$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.97$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.08$	$H(t_{r10})=0.76$ $H(t_{r90})=1.44$	$H(t_a)=1.48$	$H(t_f)=1.56$

La figura 27, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada 5V de señal continua:

Criterios desempeño para una entrada 5V.

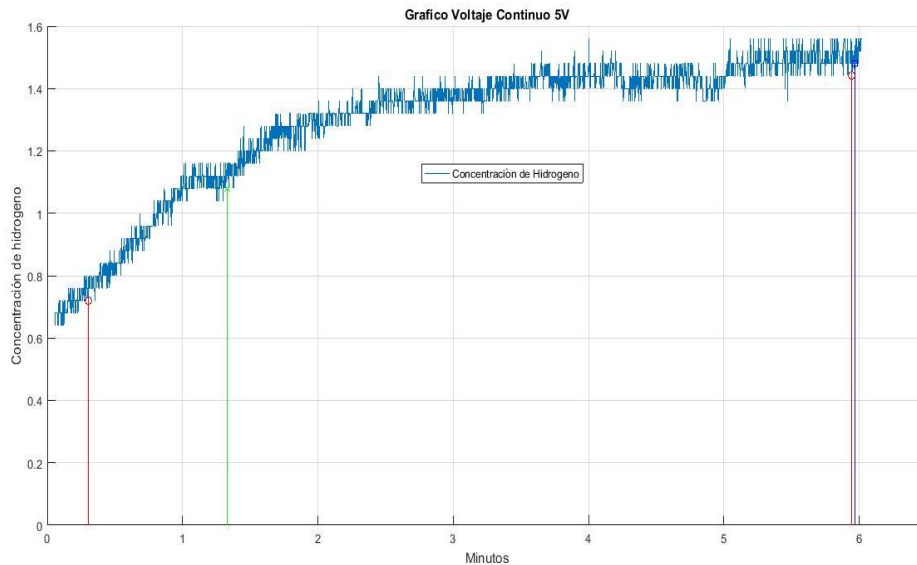


Figura 27. Criterios desempeño para una entrada 5V.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2 Resultados del segundo experimento

Medición de la producción de hidrógeno con un señal de entrada de voltaje senoidal con una amplitud de 5V, con frecuencias fijadas en 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50Khz, 100kHz y 1MHz, se presentan a continuación:

4.2.2.1 Entrada señal senoidal a 10Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 5

Tabla 5

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada senoidal de 10Hz.

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.77$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.87$; $t_{r90}=5.70$ $t_r=4.83$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.96$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.22$	$H(t_{r10})=0.66$ $H(t_{r90})=1.78$	$H(t_a)=1.84$	$H(t_f)=1.87$

En la figura 28, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 10Hz:

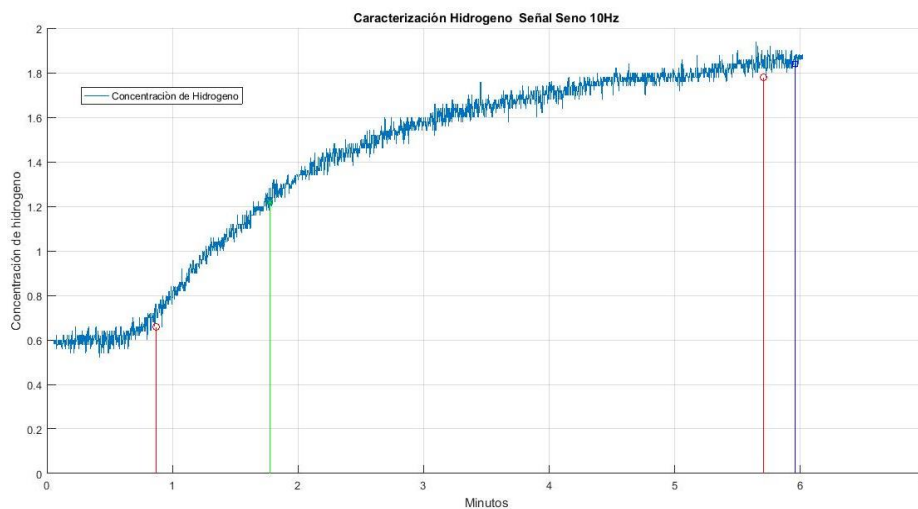


Figura 28. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 10Hz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.2 Entrada señal senoidal a 100Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 6

Tabla 6

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de senoidal 100Hz.

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.17$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.30 ; t_{r90}=5.67$ $t_r=5.21$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.16$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.74$	$H(t_a)= 1.80$	$H(t_f)=1.82$

En la figura 29, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 100Hz:

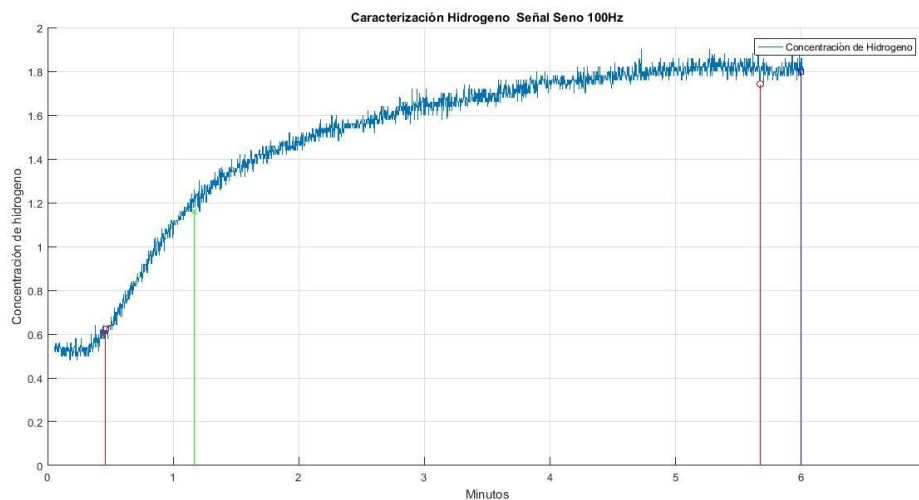


Figura 29. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 100Hz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indica el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.3 Entrada señal senoidal a 500Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 7

Tabla 7

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada de senoidal de 500Hz.

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.13$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.47 ; t_{r90}=5.82$ $t_r=5.34$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.22$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.8$	$H(t_a)= 1.88$	$H(t_f)=1.90$

En la figura 30, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 500Hz:

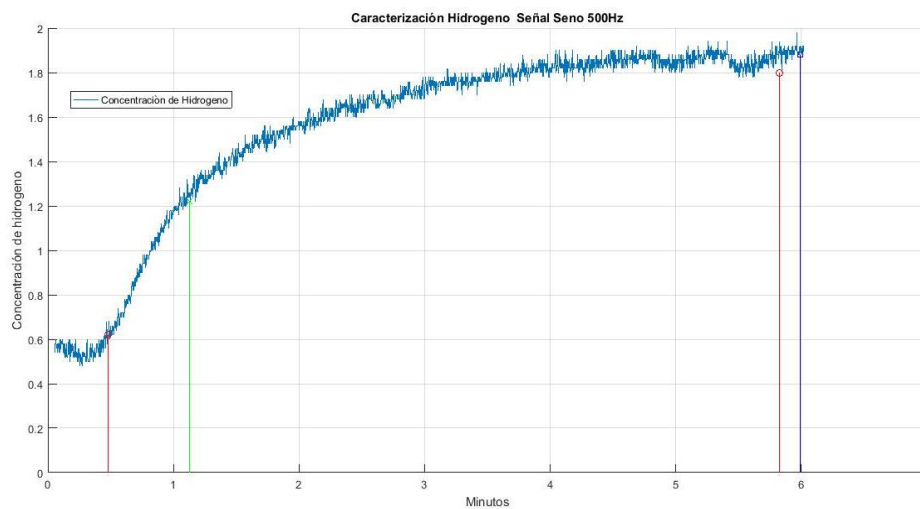


Figura 30. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 500Hz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.4 Entrada señal senoidal a 1kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 8.

Tabla 8

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal senoidal de 1kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.14$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.41 ; t_{r90}=5.01$ $t_r=4.59$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.28$	$H(t_{r10})=0.72$ $H(t_{r90})=1.84$	$H(t_a)=1.88$	$H(t_f)=1.94$

En la figura 31, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 1kHz:

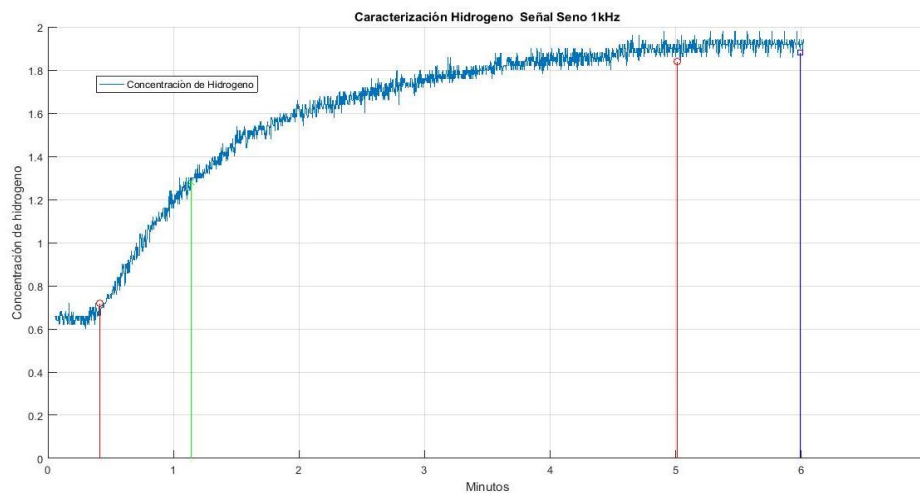


Figura 31. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 1kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indica el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.5 Entrada señal senoidal a 5kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 9.

Tabla 9

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada senoidal de 5kHz.

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.01$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.42$; $t_{r90}=4.83$ $t_r=4.41$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.97$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.52$	$H(t_{r10})=0.94$ $H(t_{r90})=2.08$	$H(t_a)=2.12$	$H(t_f)=2.18$

En la figura 32, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 5kHz:

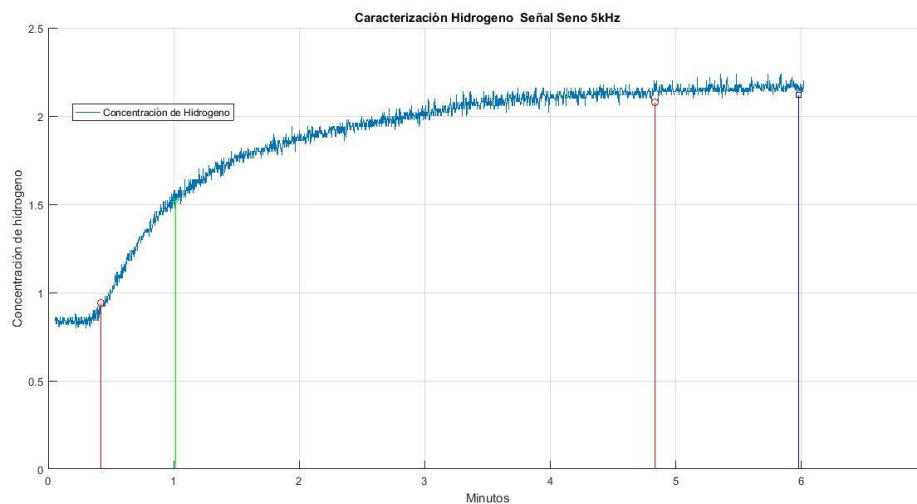


Figura 32. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 5kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo de las líneas en rojo indica el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.6 Entrada señal senoidal a 10kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 10.

Tabla 10

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada senoidal de 10KHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.96$	Tiempo de subida $t_r=4.47$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.4$	$H(t_{r10})=0.74$ $H(t_{r90})=2.08$	$H(t_a)= 2.14$	$H(t_f)=2.17$

En la figura 33, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 10kHz:

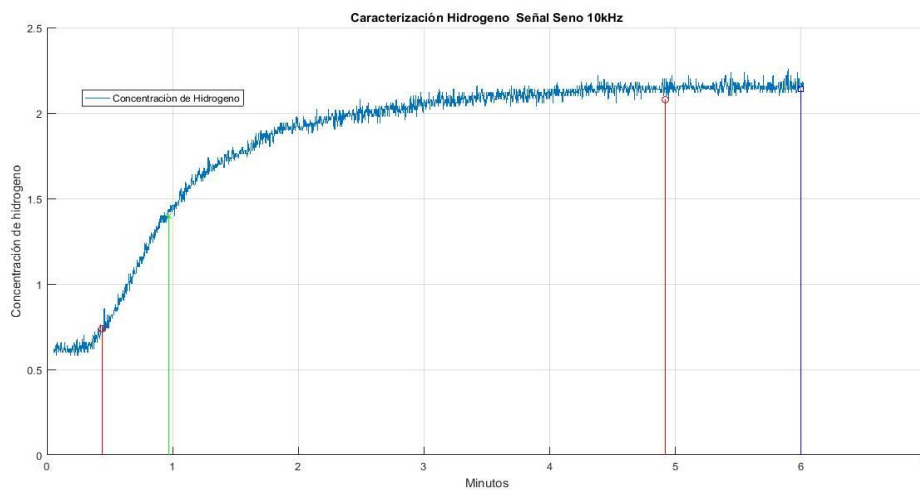


Figura 33. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 10kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.7 Entrada señal senoidal a 50kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 11.

Tabla 11

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada senoidal de 50KHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.78$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.35$; $t_{r90}=4.63$ $t_r=4.28$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.4$	$H(t_{r10})=0.70$ $H(t_{r90})=2.12$	$H(t_a)= 2.18$	$H(t_f)=2.22$

En la figura 34, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 50kHz:

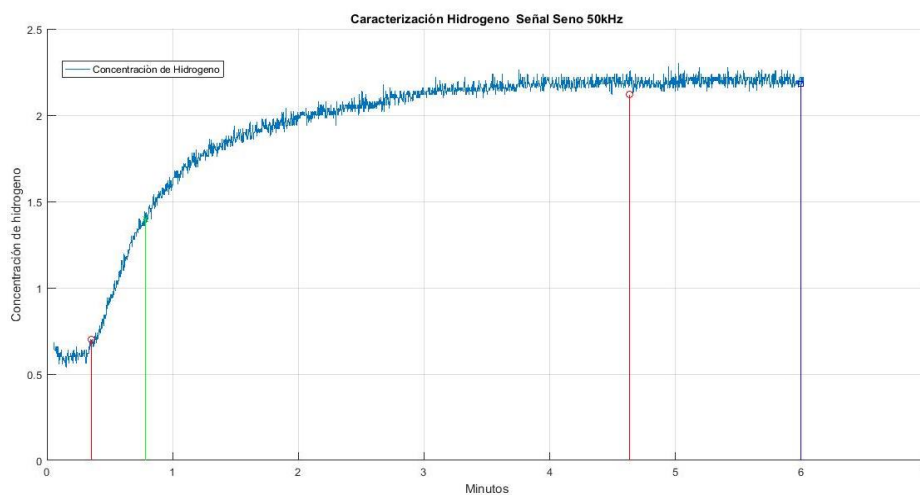


Figura 34. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 50kHz.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.8 Entrada señal senoidal a 100kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 12.

Tabla 12

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada senoidal de 100KHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.60$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.52 ; t_{r90}=6$ $t_r=5.47$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.04$	$H(t_{r10})=0.40$ $H(t_{r90})=1.64$	$H(t_a)=1.64$	$H(t_f)=1.71$

En la figura 35, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 100Khz:

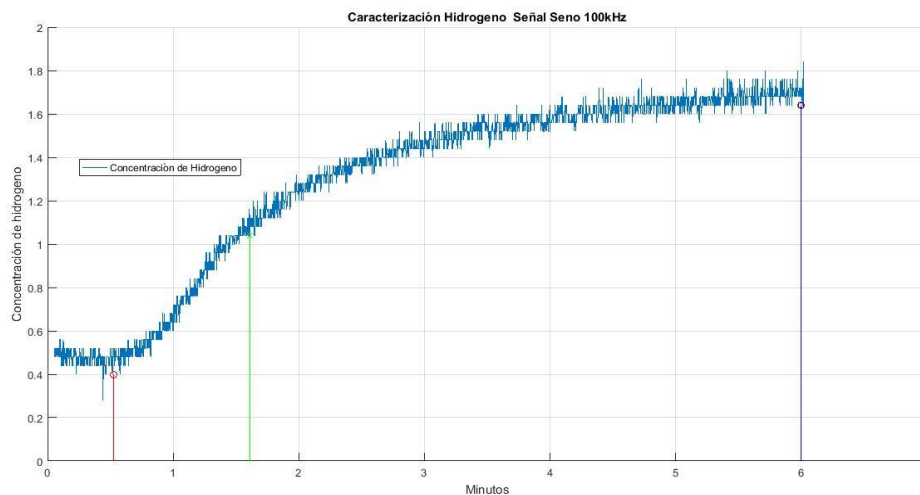


Figura 35. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 100kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.9 Entrada señal senoidal a 500kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 13.

Tabla 13

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada senoidal de 500KHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.23$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.45$; $t_{r90}=5.99$ $t_r=5.54$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.20$	$H(t_{r10})=0.68$ $H(t_{r90})=1.68$	$H(t_a)=1.68$	$H(t_f)=1.78$

En la figura 36, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 500kHz:

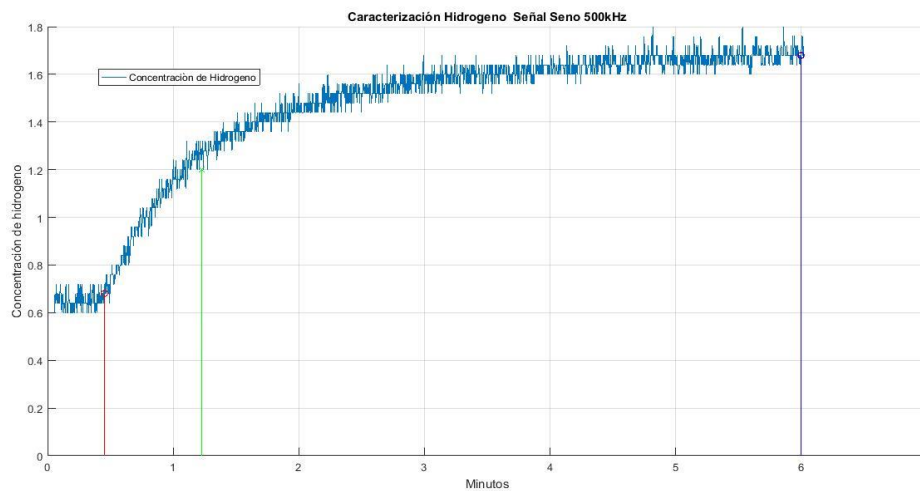


Figura 36. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 500kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.2.10 Entrada señal senoidal a 1MHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 14.

Tabla 14

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada senoidal de 1MHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.09$	Tiempo de subida $t_r=4.96$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.16$	$H(t_{r10})=0.72$ $H(t_{r90})=1.72$	$H(t_a)=1.76$	$H(t_f)=1.83$

En la figura 37, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada senoidal de 1MHz:

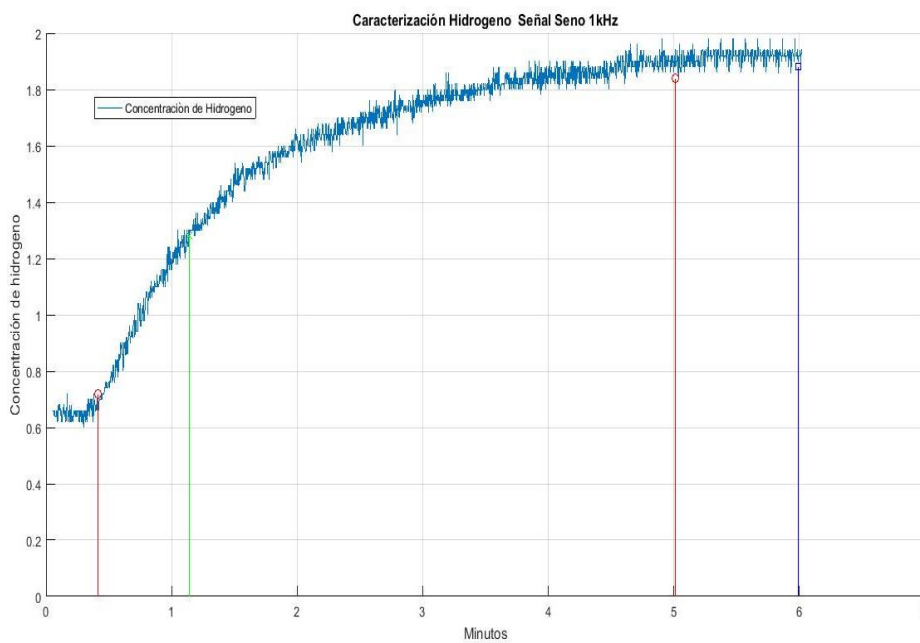


Figura 37. Criterios de desempeño para una entrada senoidal de 1MHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3 Resultados del tercer experimento

Medición de la producción de hidrógeno con una señal de entrada de señal cuadrada con una amplitud de 5V, con frecuencias fijadas en 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50Khz, 100kHz y 1MHz, se presentan a continuación:

4.2.3.1 Entrada señal cuadrada a 10Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 15.

Tabla 15

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 10Hz.

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.50$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.39$; $t_{r90}=5.99$ $t_r=5.59$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.90$	$H(t_{r10})=0.56$ $H(t_{r90})=1.22$	$H(t_a)=1.26$	$H(t_f)=1.28$

En la figura 38, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadrada de 10Hz.

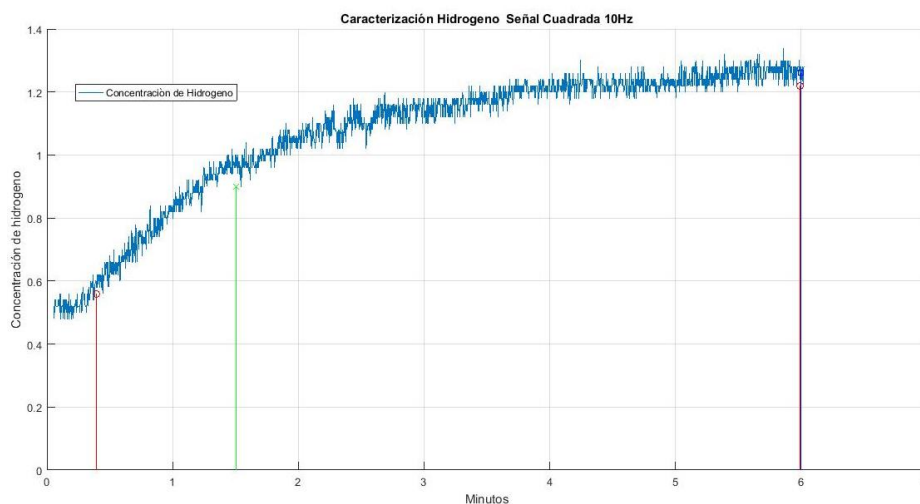


Figura 38. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 10Hz.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indica el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.2 Entrada señal cuadrada a 100Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 16

Tabla 16

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 100Hz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.83$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.40$; $t_{r90}=6$ $t_r=5.59$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.76$	$H(t_{r10})=0.52$ $H(t_{r90})=1$	$H(t_a)=1$	$H(t_f)=1.03$

En la figura 39, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 100Hz.

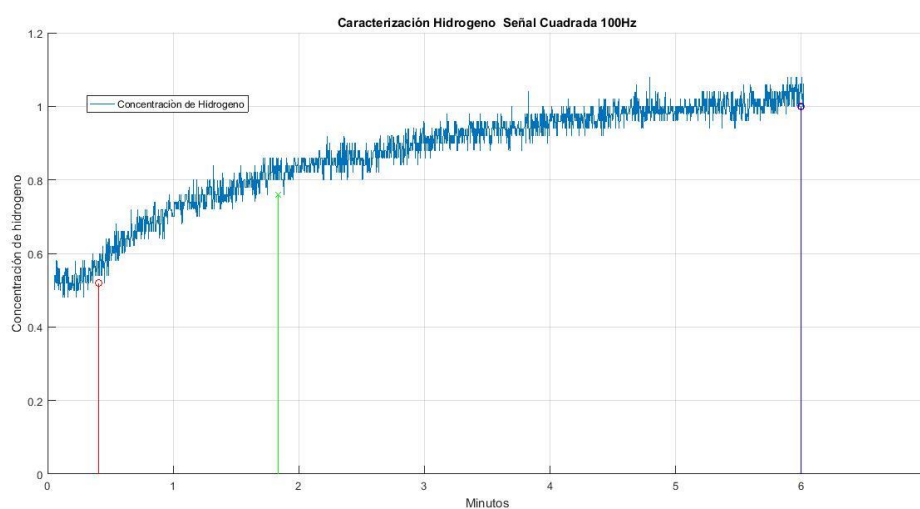


Figura 39. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 100Hz.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.3 Entrada señal cuadrada a 500Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 17

Tabla 17

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 500Hz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.38$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.15$; $t_{r90}=6$ $t_r=5.84$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.82$	$H(t_{r10})=0.52$ $H(t_{r90})=1.08$	$H(t_a)= 1.08$	$H(t_f)=1.08$

En la figura 40, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 500Hz.

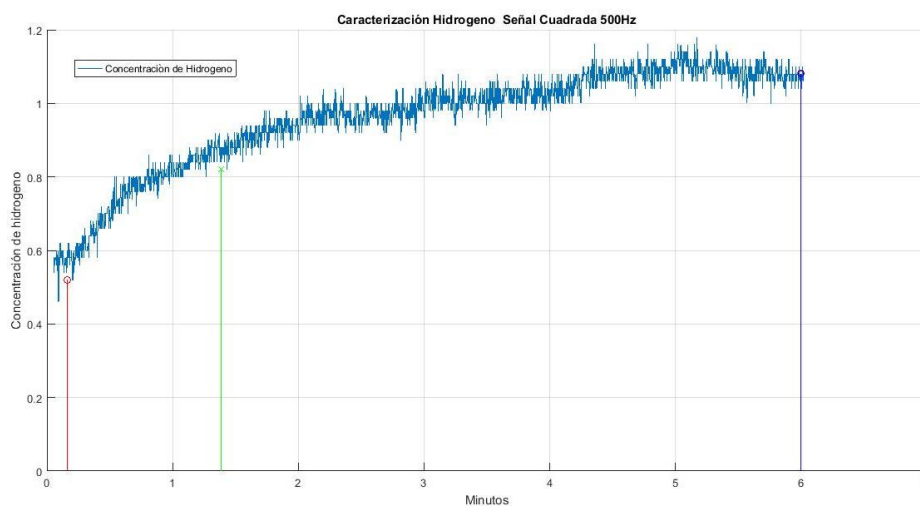


Figura 40. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 500Hz.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.4 Entrada señal cuadrada a 1kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 18.

Tabla 18

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 1kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.50$	Tiempo de subida $t_r=5.42$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.90$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.20$	$H(t_a)=1.22$	$H(t_f)=1.23$

En la figura 41, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 1kHz.

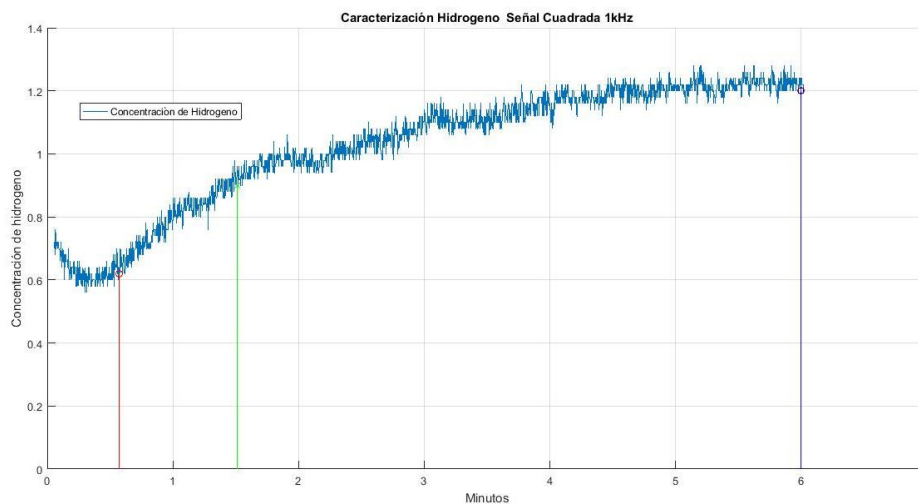


Figura 41. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 1kHz.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.5 Entrada señal cuadrada a 5kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 19.

Tabla 19

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 5kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.74$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.65$; $t_{r90}=6$ $t_r=5.34$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.94$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.24$	$H(t_a)=1.24$	$H(t_f)=1.25$

En la figura 42, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 5kHz.

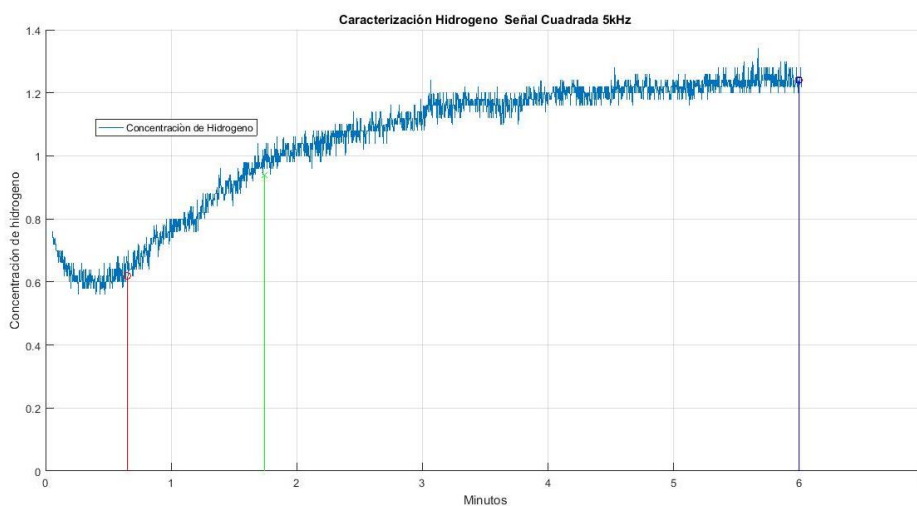


Figura 42. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 5kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indica el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.6 Entrada señal cuadrada a 10kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 20.

Tabla 20

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 10kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.42$	Tiempo de subida $t_r=5.49$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.84$	$H(t_{r10})=0.50$ $H(t_{r90})=1.14$	$H(t_a)= 1.16$	$H(t_f)=1.18$

En la figura 43, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 10kHz.

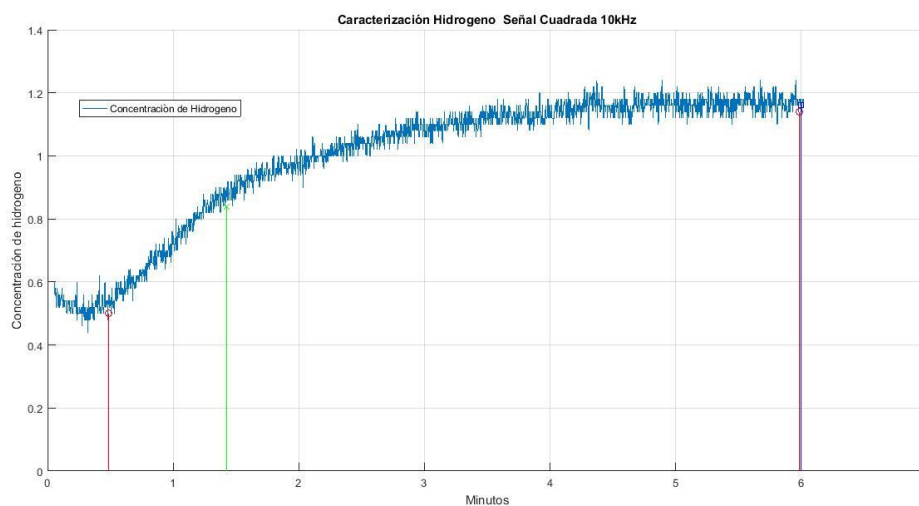


Figura 43. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 10kHz.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indica el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.7 Entrada señal cuadrada a 50kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 21.

Tabla 21

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 50kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.32$	Tiempo de subida $t_r=5.69$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.94$	$H(t_{r10})=0.58$ $H(t_{r90})=1.32$	$H(t_a)=1.34$	$H(t_f)=1.34$

En la figura 44, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 50kHz.

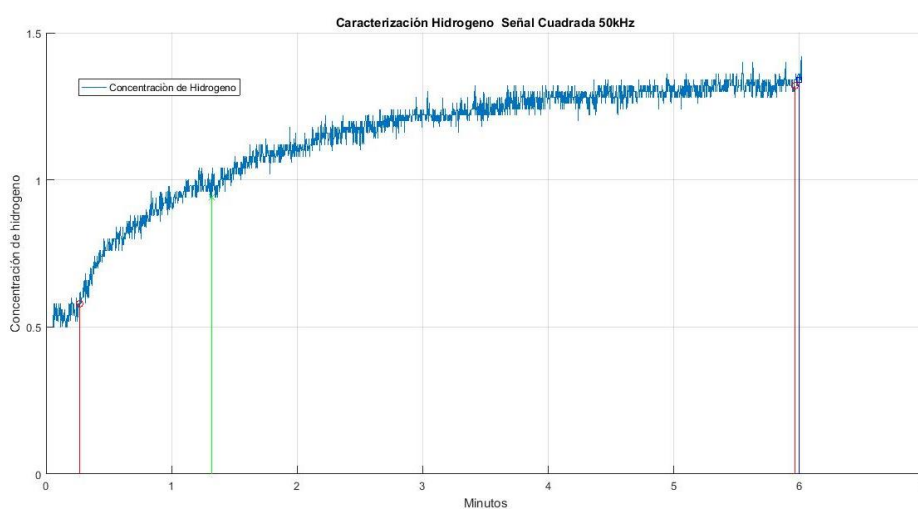


Figura 44. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 50kHz.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.8 Entrada señal cuadrada a 100kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios desempeño de definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 22.

Tabla 22

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 100kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.16$	Tiempo de subida $t_r=5.72$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.94$	$H(t_{r10})=0.56$ $H(t_{r90})=1.34$	$H(t_a)= 1.36$	$H(t_f)=1.38$

En la figura 45, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 100kHz.

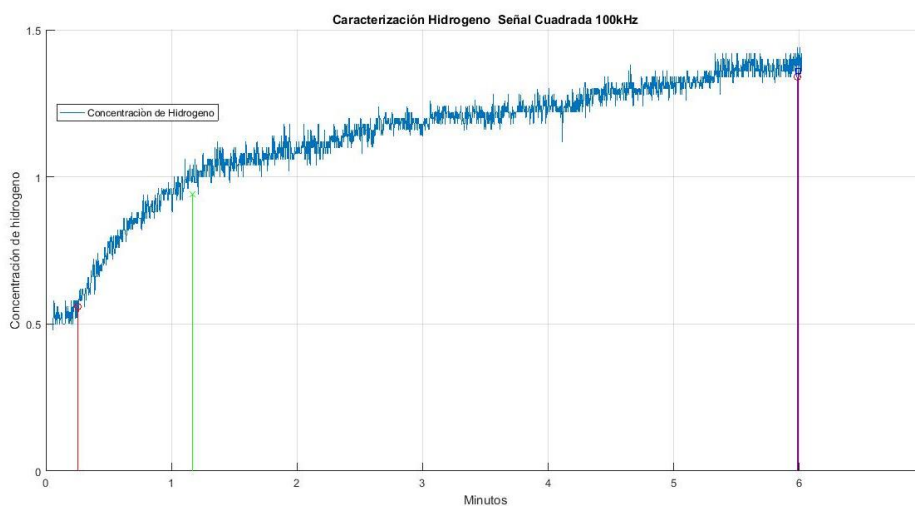


Figura 45. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 100kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indica el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.9 Entrada señal cuadrada a 500kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 23.

Tabla 23

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 500kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.08$	Tiempo de subida $t_{r10-0.25}; t_{r90-6}$ $t_r=5.74$	Tiempo de asentamiento $t_a=6$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.04$	$H(t_{r10})=0.68$ $H(t_{r90})=1.42$	$H(t_a)= 1.42$	$H(t_f)=1.43$

En la figura 46, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 500kHz.

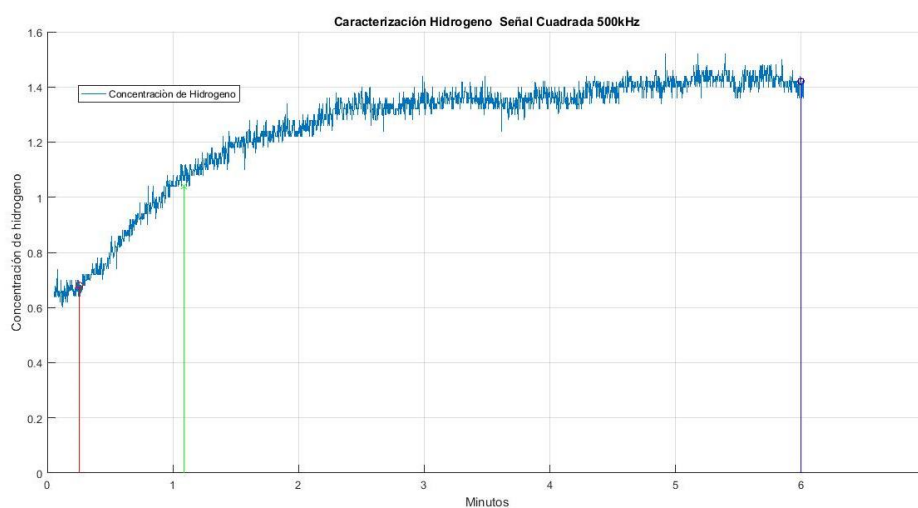


Figura 46. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 500kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.3.10 Entrada señal cuadrada a 1MHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 24.

Tabla 24

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada de 1MHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.08$	Tiempo de subida $t_r=5.59$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.38$	$H(t_a)=1.38$	$H(t_f)=1.42$

En la figura 47, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada cuadra de 1MHz.

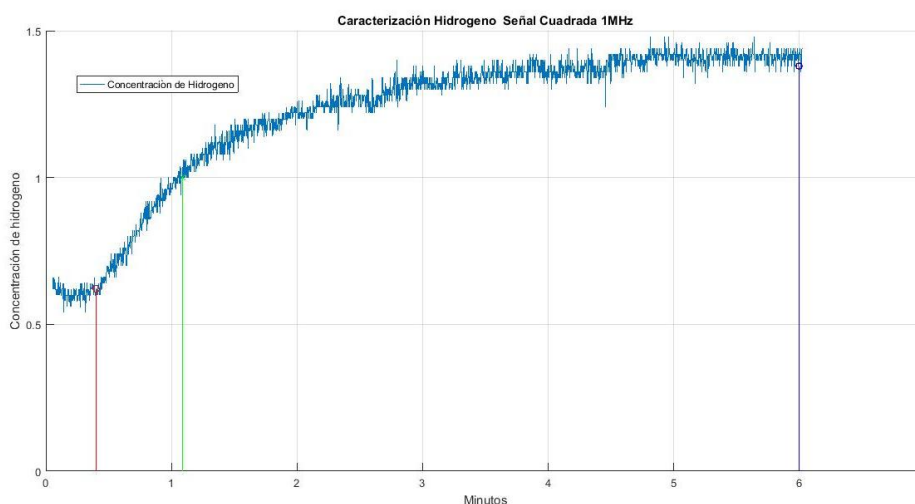


Figura 47. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 1MHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4 Resultados del cuarto experimento

Medición de la producción de hidrógeno con un señal de entrada de señal triangular con una amplitud de 5V, con frecuencias fijadas en 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50Khz, 100kHz y 1MHz, se presentan a continuación:

4.2.4.1 Entrada señal triangular a 10Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 25.

Tabla 25

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 10Hz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.29$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.09 ; t_{r90}=5.96$ $t_r=5.86$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1$	$H(t_{r10})=0.68$ $H(t_{r90})=1.32$	$H(t_a)= 1.36$	$H(t_f)=1.38$

En la figura 48, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 10Hz.

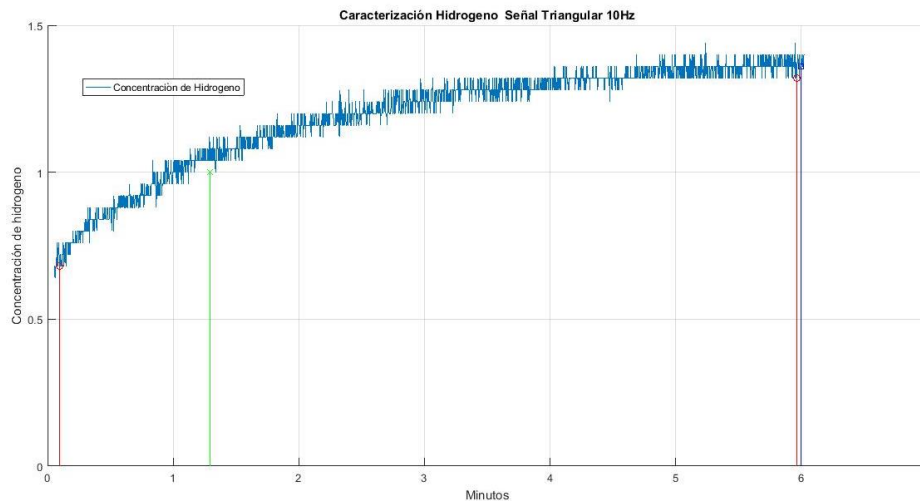


Figura 48. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 10Hz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indica el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.2 Entrada señal triangular a 100Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 26.

Tabla 26

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 100Hz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.42$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.49 ; t_{r90}=5.96$ $t_r=5.47$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.84$	$H(t_{r10})=0.44$ $H(t_{r90})=1.24$	$H(t_a)= 1.28$	$H(t_f)=1.28$

En la figura 49, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 100Hz.

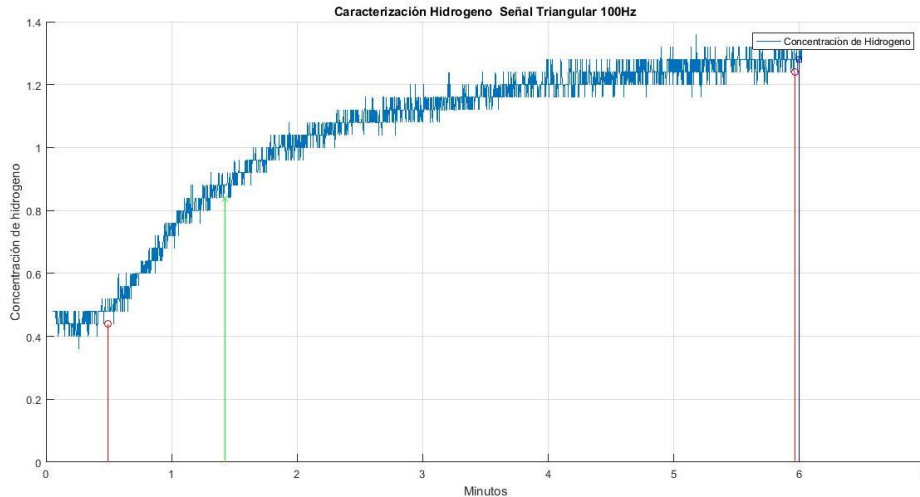


Figura 49. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 100Hz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.3 Entrada señal triangular a 500Hz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 27.

Tabla 27

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 500Hz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.66$	Tiempo de subida $t_r=5.36$	Tiempo de asentamiento $t_a=6.00$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.96$	$H(t_{r10})=0.56$ $H(t_{r90})=1.36$	$H(t_a)=1.40$	$H(t_f)=1.42$

En la figura 50, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 500Hz.

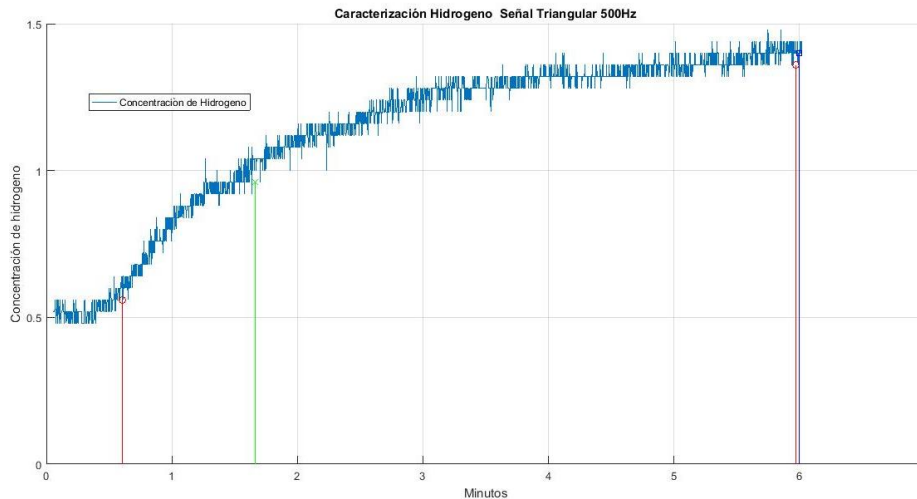


Figura 50. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 500Hz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.4 Entrada señal triangular a 1kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 28.

Tabla 28

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 1kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.71$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.11 ; t_{r90}=5.99$ $t_r=5.88$	Tiempo de asentamiento $t_a=6.00$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.28$	$H(t_{r10})=0.72$ $H(t_{r90})=1.84$	$H(t_a)=1.88$	$H(t_f)=1.43$

En la figura 51, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 1kHz.

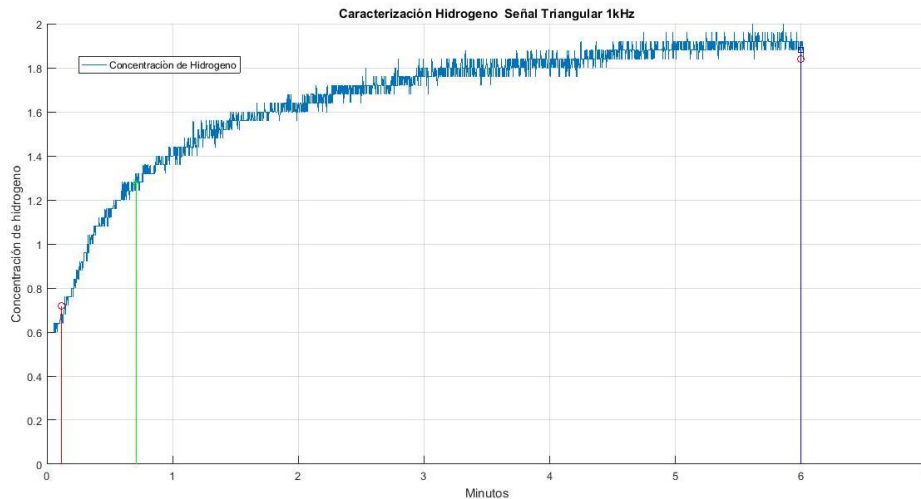


Figura 51. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 1kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.5 Entrada señal triangular a 5kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 29.

Tabla 29

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 5kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.36$	Tiempo de subida $t_{10}=0.45 ; t_{90}=6.00$ $t_r=5.55$	Tiempo de asentamiento $t_a=6.00$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1$	$H(t_{10})=0.56$ $H(t_{90})=1.44$	$H(t_a)=1.44$	$H(t_f)=1.48$

En la figura 52, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 5kHz.

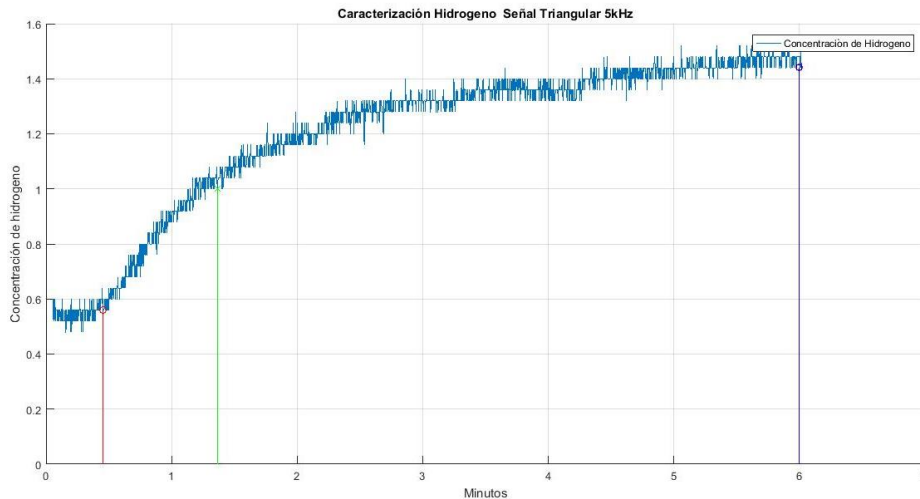


Figura 52. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 50Hz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.6 Entrada señal triangular a 10kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 30.

Tabla 30

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 10kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.99$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.37 ; t_{r90}=4.97$ $t_r=4.59$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.99$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.24$	$H(t_{r10})=0.68$ $H(t_{r90})=1.80$	$H(t_a)= 1.84$	$H(t_f)=1.93$

En la figura 53, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 10kHz.

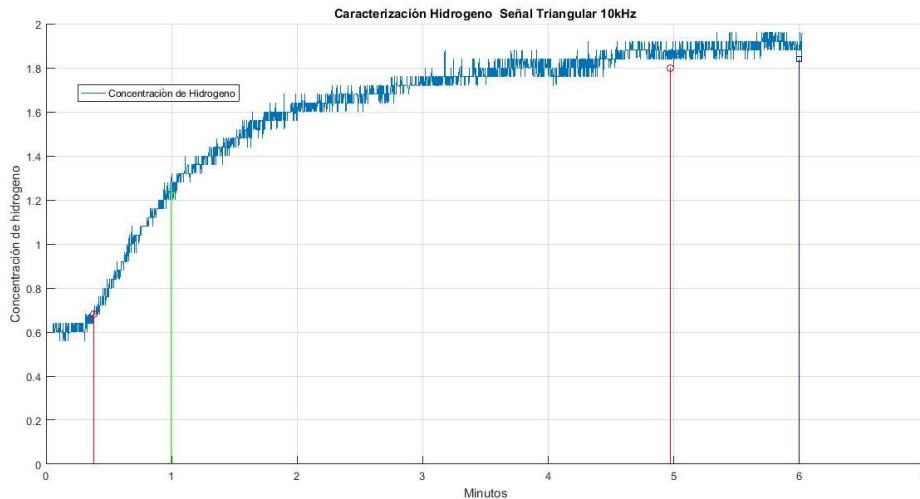


Figura 53. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 10kHz.

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.7 Entrada señal triangular a 50kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 31.

Tabla 31

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 50kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.99$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.44$; $t_{r90}=5.94$ $t_r=5.49$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.98$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.20$	$H(t_{r10})=0.60$ $H(t_{r90})=1.80$	$H(t_a)=1.84$	$H(t_f)=1.91$

En la figura 54, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 50kHz.

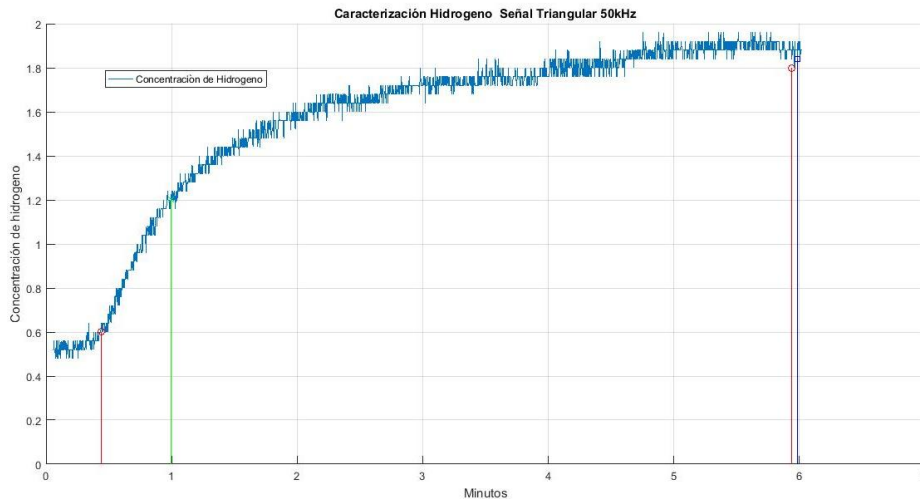


Figura 54. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 50kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.8 Entrada señal triangular a 100kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 32.

Tabla 32

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 100kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=1.02$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.47 ; t_{r90}=6.00$ $t_r=5.52$	Tiempo de asentamiento $t_a=6.00$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.24$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.64$	$H(t_a)=1.64$	$H(t_f)=1.89$

En la figura 55, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 100kHz.

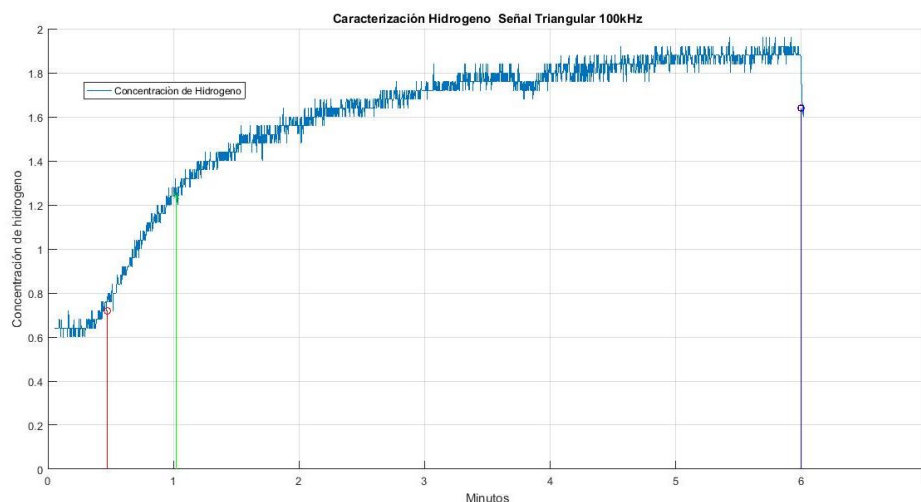


Figura 55. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 100kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.9 Entrada señal triangular a 500kHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 33.

Tabla 33

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 500kHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.97$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.41 ; t_{r90}=5.65$ $t_r=5.24$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.81$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.24$	$H(t_{r10})=0.72$ $H(t_{r90})=1.80$	$H(t_a)=1.84$	$H(t_f)=1.91$

En la figura 56, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 500kHz.

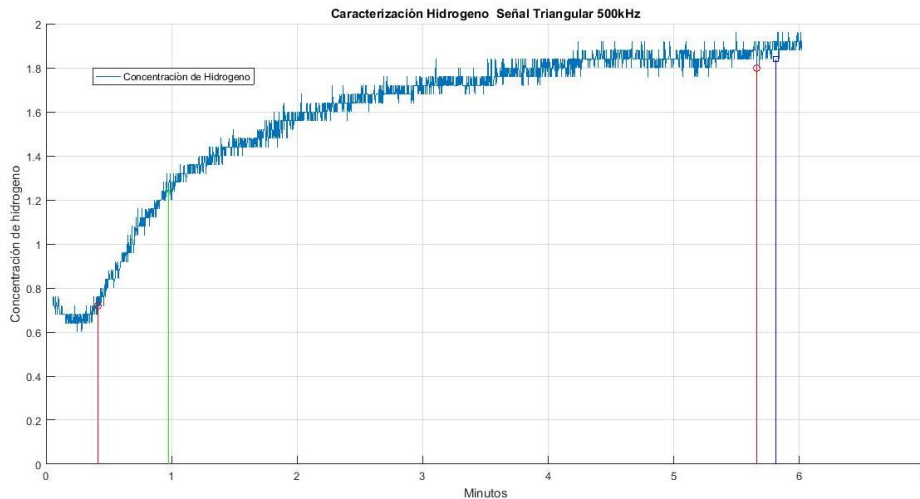


Figura 56. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 500kHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.4.10 Entrada señal triangular a 1MHz

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 34.

Tabla 34

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular de 1MHz

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.90$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.33$; $t_{r90}=5.83$ $t_r=5.49$	Tiempo de asentamiento $t_a=5.98$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.28$	$H(t_{r10})=0.68$ $H(t_{r90})=1.88$	$H(t_a)=1.92$	$H(t_f)=1.90$

En la figura 57, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para una entrada triangular de 1MHz.

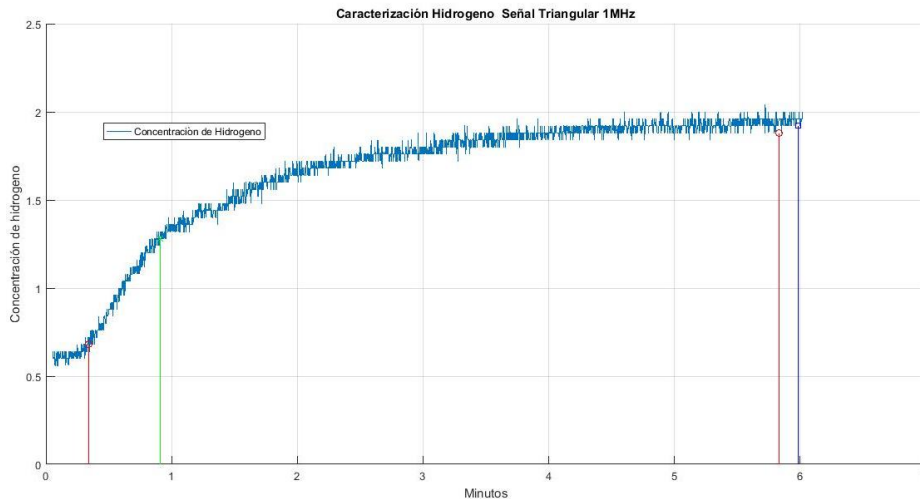


Figura 57. Criterios de desempeño para una señal cuadrada de 1MHz

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.2.5 Discusión de los resultados de la onda senoidal

El resumen de los resultados obtenidos de la onda senoidal para las frecuencias de 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, 100Khz y 1Mhz se muestran en la tabla 35

.Tabla 35

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada seno a diferentes frecuencias

	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=1.77$	$t_r=4.83$	$t_a=5.96$	$t_f=6.02$
SENOIDAL	% Concentración de hidrógeno				
10Hz	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.22$	$H(t_{r10})=0.66$ $H(t_{r90})=1.78$	$H(t_a)=1.84$	$H(t_f)=1.86$
ONDA	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
SENOIDAL	$T_{po}=NA$	$t_d=1.17$	$t_r=5.21$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
100Hz	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.16$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.74$	$H(t_a)=1.80$	$H(t_f)=1.80$

	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA SENOIDAL 500Hz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.13$	$t_r=5.34$ $t_{r10}=0.47$; $t_{r90}=5.82$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.22$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.80$	$H(t_a)=1.88$	$H(t_f)=1.92$
ONDA SENOIDAL 1kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.14$	$t_r=4.59$ $t_{r10}=0.41$; $t_{r90}=5.01$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.28$	$H(t_{r10})=0.72$ $H(t_{r90})=1.84$	$H(t_a)=1.88$	$H(t_f)=1.94$
ONDA SENOIDAL 5kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.01$	$t_r=4.41$ $t_{r10}=0.42$; $t_{r90}=4.83$	$t_a=5.97$	$t_f=6.02$
	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.52$	$H(t_{r10})=0.94$ $H(t_{r90})=2.08$	$H(t_a)=2.12$	$H(t_f)=2.16$
ONDA SENOIDAL 10kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=0.96$	$t_r=4.47$ $t_{r10}=0.44$; $t_{r90}=4.91$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.4$	$H(t_{r10})=0.74$ $H(t_{r90})=2.08$	$H(t_a)=2.14$	$H(t_f)=2.18$
ONDA SENOIDAL 50kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=0.78$	$t_r=4.28$ $t_{r10}=0.35$; $t_{r90}=4.63$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.4$	$H(t_{r10})=0.70$ $H(t_{r90})=2.12$	$H(t_a)=2.18$	$H(t_f)=2.22$
ONDA SENOIDAL 100kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.60$	$t_r=5.47$ $t_{r10}=0.52$; $t_{r90}=6$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.04$	$H(t_{r10})=0.40$ $H(t_{r90})=1.64$	$H(t_a)=1.64$	$H(t_f)=1.71$
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=1.23$	$t_r=5.54$ $t_{r10}=0.45$; $t_{r90}=5.99$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$

SENOIDAL					
500kHz		%Concentración de hidrógeno			
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.20$	$H(t_{r10})=0.68$	$H(t_a)=1.68$	$H(t_f)=1.78$
			$H(t_{r90})=1.68$		
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=1.09$	$t_r=4.96$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
SENOIDAL			$t_{r10}=0.46; t_{r90}=5.43$		
1MHz					
		%Concentración de hidrógeno			
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.16$	$H(t_{r10})=0.72$	$H(t_a)=1.76$	$H(t_f)=1.83$
			$H(t_{r90})=1.72$		

Según el análisis de la tabla 35, se ve que el mejor rango de frecuencias para producción de hidrógeno es desde los 5khz hasta los 50Khz para una onda senoidal. La frecuencia que obtiene la mayor cantidad de hidrógeno se encuentra en 50kHz, con un 2.22 de hidrógeno, con un tiempo de retardo con un valor de 0.78 minutos, con un valor 1.40, con un tiempo de subida de 4.28 minutos, con un tiempo de asentamiento de 5.99 minutos con un valor de hidrógeno de 2.18.

4.2.6 Discusión de los resultados de la onda cuadrada

El resumen de los resultados obtenidos de la onda cuadrada para las frecuencias de 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, 100Khz y 1Mhz se muestran en la tabla 36.

Tabla 36

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada cuadrada a diferentes frecuencias

		Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
		$T_{po}=NA$	$t_d=1.50$	$t_r=5.59$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
ONDA				$t_{r10}=0.39; t_{r90}=5.99$		
CUADRADA		%Concentración de hidrógeno				
10Hz	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.90$	$H(t_{r10})=0.56$	$H(t_a)=1.26$	$H(t_f)=1.28$	
			$H(t_{r90})=1.22$			
		Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA		$T_{po}=NA$	$t_d=1.83$	$t_r=5.59$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
CUADRADA				$t_{r10}=0.40; t_{r90}=6$		
		%Concentración de hidrógeno				
100Hz	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.76$	$H(t_{r10})=0.52$	$H(t_a)=1$	$H(t_f)=1.04$	
			$H(t_{r90})=1$			

	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA CUADRADA 500Hz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.38$	$t_r=5.84$ $t_{r10}=0.15$; $t_{r90}=6$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.82$	$H(t_{r10})=0.52$ $H(t_{r90})=1.08$	$H(t_a)=1.08$	$H(t_f)=1.08$
ONDA TRIANGULAR 1kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.50$	$t_r=5.42$ $t_{r10}=0.57$; $t_{r90}=5.99$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.90$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.20$	$H(t_a)=1.22$	$H(t_f)=1.22$
ONDA CUADRADA 5kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.74$	$t_r=5.34$ $t_{r10}=0.65$; $t_{r90}=6$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.94$	$H(t_{r10})=0.62$ $H(t_{r90})=1.24$	$H(t_a)=1.24$	$H(t_f)=1.24$
ONDA CUADRADA 10kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.42$	$t_r=5.49$ $t_{r10}=0.48$; $t_{r90}=5.98$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.84$	$H(t_{r10})=0.50$ $H(t_{r90})=1.14$	$H(t_a)=1.16$	$H(t_f)=1.16$
ONDA CUADRADA 50kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.32$	$t_r=5.69$ $t_{r10}=0.26$; $t_{r90}=5.96$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.94$	$H(t_{r10})=0.58$ $H(t_{r90})=1.32$	$H(t_a)=1.34$	$H(t_f)=1.34$
ONDA CUADRADA 100kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.16$	$t_r=5.72$ $t_{r10}=0.25$; $t_{r90}=5.98$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.94$	$H(t_{r10})=0.56$ $H(t_{r90})=1.34$	$H(t_a)=1.36$	$H(t_f)=1.38$
ONDA CUADRADA 500kHz	$T_{po}=NA$	$t_d=1.08$	$t_r=5.74$ $t_{r10}=0.25$; $t_{r90}=6$	$t_a=6$	$t_f=6.02$
	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.04$	$H(t_{r10})=0.68$ $H(t_{r90})=1.42$	$H(t_a)=1.42$	$H(t_f)=1.42$

	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA CUADRADA	$T_{po}=NA$	$t_d=1.08$	$t_r=5.59$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
			$t_{r10}=0.39$; $t_{r90}=5.99$		
1MHz	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1$	$H(t_{r10})=0.62$	$H(t_a)= 1.38$	$H(t_f)=1.44$
			$H(t_{r90})=1.38$		

Según el análisis de la tabla 36, se ve que el mejor rango de frecuencias para la producción de hidrógeno es desde los 100kHz hasta los 1Mhz para un onda cuadrada, la frecuencia que obtiene la mayor cantidad de hidrógeno se encuentra en 500kHz, con un 1.43 de hidrógeno, con un tiempo de retardo con un valor de 1.08 minutos, con un valor de hidrógeno de 1.04, con un tiempo de subida de 5.74 minutos, con un tiempo de asentamiento de 6 minutos y un valor de hidrógeno de 1.42.

4.2.7 Discusión de los resultados de la onda triangular

El resumen de los resultados obtenidos de la onda cuadrada para las frecuencias de 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, 100Khz y 1Mhz se muestran en la tabla 37.

Tabla 37

Criterios de desempeño la respuesta de producción de hidrógeno para una señal de entrada triangular a diferentes frecuencias

	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA TRIANGULAR	$T_{po}=NA$	$t_d=1.29$	$t_r=5.86$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
			$t_{r10}=0.09$; $t_{r90}=5.96$		
10Hz	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1$	$H(t_{r10})=0.68$	$H(t_a)= 1.36$	$H(t_f)=1.44$
			$H(t_{r90})=1.32$		
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA TRIANGULAR	$T_{po}=NA$	$t_d=1.42$	$t_r=5.47$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
			$t_{r10}=0.49$; $t_{r90}=5.96$		
100Hz	% Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.84$	$H(t_{r10})=0.44$	$H(t_a)= 1.28$	$H(t_f)=1.32$
			$H(t_{r90})=1.24$		
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
	$T_{po}=NA$	$t_d=1.66$	$t_r=5.36$	$t_a=6.00$	$t_f=6.02$
			$t_{r10}=0.60$; $t_{r90}=5.97$		

ONDA	%Concentración de hidrógeno				
TRIANGULAR	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.96$	$H(t_{r10})=0.56$	$H(t_a)=1.40$	$H(t_f)=1.40$
500Hz	$H(t_{r90})=1.36$				
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=0.71$	$t_r=5.88$	$t_a=6.00$	$t_f=6.02$
TRIANGULAR	$t_{r10}=0.11 ; t_{r90}=5.99$				
1kHz	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.28$	$H(t_{r10})=0.72$	$H(t_a)=1.88$	$H(t_f)=1.88$
	$H(t_{r90})=1.84$				
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=1.36$	$t_r=5.55$	$t_a=6.00$	$t_f=6.02$
TRIANGULAR	$t_{r10}=0.45 ; t_{r90}=6.00$				
5kHz	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1$	$H(t_{r10})=0.56$	$H(t_a)=1.44$	$H(t_f)=1.44$
	$H(t_{r90})=1.44$				
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=0.99$	$t_r=4.59$	$t_a=5.99$	$t_f=6.02$
TRIANGULAR	$t_{r10}=0.37 ; t_{r90}=4.97$				
10kHz	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.24$	$H(t_{r10})=0.68$	$H(t_a)=1.84$	$H(t_f)=1.96$
	$H(t_{r90})=1.80$				
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=0.99$	$t_r=5.49$	$t_a=5.98$	$t_f=6.02$
TRIANGULAR	$t_{r10}=0.44 ; t_{r90}=5.94$				
50kHz	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.20$	$H(t_{r10})=0.60$	$H(t_a)=1.84$	$H(t_f)=1.88$
	$H(t_{r90})=1.80$				
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=1.02$	$t_r=5.52$	$t_a=6.00$	$t_f=6.02$
TRIANGULAR	$t_{r10}=0.47 ; t_{r90}=6.00$				
100kHz	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.24$	$H(t_{r10})=0.62$	$H(t_a)=1.64$	$H(t_f)=1.64$
	$H(t_{r90})=1.64$				
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=0.97$	$t_r=5.24$	$t_a=5.81$	$t_f=6.02$
TRIANGULAR	$t_{r10}=0.41 ; t_{r90}=5.65$				
500kHz	%Concentración de hidrógeno				
	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=1.24$	$H(t_{r10})=0.72$	$H(t_a)=1.84$	$H(t_f)=1.92$
	$H(t_{r90})=1.80$				
	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA	$T_{po}=NA$	$t_d=0.90$	$t_r=5.49$	$t_a=5.98$	$t_f=6.02$
	$t_{r10}=0.33 ; t_{r90}=5.83$				

TRIANGULAR	% Concentración de hidrógeno				
1MHz	H(T _{po})=0	H(t _d)=1.28	H(t _{r10})=0.68	H(t _a)= 1.92	H(t _r)=1.96
			H(t _{r90})=1.88		

Según el análisis de la tabla 37, se ve que el mejor rango de frecuencias para la producción de hidrógeno es desde los 10khz hasta los 50Khz para un onda triangular, la frecuencia que obtiene la mayor cantidad de hidrógeno se encuentra en 10kHz, con un 1.93 de hidrógeno, con un tiempo de retardo con un valor de 0.99 minutos, con un valor de 1.24 de hidrógeno, con un tiempo de subida de 4.59 minutos, un tiempo de asentamiento de 5.99 minutos y un valor de hidrógeno de 1.84.

4.2.8 Discusión de los resultados entre la señal continua a 5V, senoidal, cuadrada y triangular

La tabla 38 muestra la mayor cantidad de producción de hidrógeno entre las señales de entrada continua, senoidal, cuadrada y triangular

Tabla 38

Mayores cantidades de producción de hidrógeno entre las señales de entrada continua, senoidal, cuadrada y triangular

SEÑAL CONTINUA 5V	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.33 ; t_{r90}=5.94</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
	T _{po} =NA	t _d =1.25	t _r =5.61	t _a =5.97	t _r =6.02
	Concentración de hidrógeno				
	H(T _{po})=0	H(t _d)=1.08	H(t _{r10})=0.76	H(t _a)= 1.48	H(t _r)=1.52
			H(t _{r90})=1.44		
ONDA SENOIDAL 50kHz	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.35 ; t_{r90}=4.63</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
	T _{po} =NA	t _d =0.78	t _r =4.28	t _a =6	t _r =6.02
	Concentración de hidrógeno				
	H(T _{po})=0	H(t _d)=1.4	H(t _{r10})=0.70	H(t _a)= 2.18	H(t _r)=2.22
			H(t _{r90})=2.12		
ONDA CUADRADA 500kHz	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.25 ; t_{r90}=6</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
	T _{po} =NA	t _d =1.08	t _r =5.74	t _a =6	t _r =6.02

		Concentración de hidrógeno				
		H(T _{po})=0	H(t _d)=1.04	H(t _{r10})=0.68	H(t _a)= 1.42	H(t _r)=1.43
		H(t _{r90})=1.42				
		Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.33 ; t_{r90}=5.83</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
ONDA		T _{po} =NA	t _d =0.99	t _r =4.59	t _a =5.99	t _r =6.02
TRIANGULAR		Concentración de hidrógeno				
10kHz		H(T _{po})=0	H(t _d)=1.24	H(t _{r10})=0.68	H(t _a)= 1.84	H(t _r)=1.93
		H(t _{r90})=1.80				

Según el análisis de la tabla 38, se ve que la mayor cantidad de hidrógeno se produce por la onda senoidal a 50kHz con un valor de 2.22, un tiempo de retardo de 0.78 minutos con un valor de hidrógeno de 1.4 en ese tiempo, un tiempo de subida de 4.28 minutos y un tiempo de asentamiento de 6 minutos con un valor de hidrógeno en ese tiempo de 2.18.

La segunda mejor producción de hidrógeno se produce por la onda triangular a 10kHz con un valor de 1.93, un tiempo de retardo de 0.99 minutos con un valor de hidrógeno en ese tiempo de 1.24, un tiempo de subida de 4.59 minutos y un tiempo de asentamiento de 5.99 minutos con un valor de hidrógeno en ese tiempo de 1.84.

La tercera mejor producción de hidrógeno se produce por la onda señal continua de 5V con un valor de 1.52, un tiempo de retardo de 1.25 minutos con un valor de hidrógeno en ese tiempo de 1.08, un tiempo de subida de 5.61 minutos y un tiempo de asentamiento de 5.97 minutos con un valor de hidrógeno en ese tiempo de 1.48.

Y por último la producción de hidrógeno de la señal cuadrada a 500kHz es de 1.43, con un valor de hidrógeno en ese tiempo de 1.08 minutos, un tiempo de subida de 5.74 minutos y un tiempo de asentamiento de 6 minutos con un valor de hidrógeno en ese tiempo de 1.43.

4.3 Resultados de la expresión matemática de la celda de hidrógeno

4.3.1 Primera estimación

La determinación del modelo utiliza la Ecuación 52

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K}{T_I s + 1} \quad (52)$$

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 39.

Tabla 39

Criterios de desempeño la respuesta de la primera estimación

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.95$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.15$; $t_{r90}=3.07$ $t_r=2.91$	Tiempo de asentamiento $t_a=3.88$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.39$	$H(t_{r10})=0.07$ $H(t_{r90})=0.72$	$H(t_a)=0.75$	$H(t_f)=0.80$

En la figura 58, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para la primera estimación.

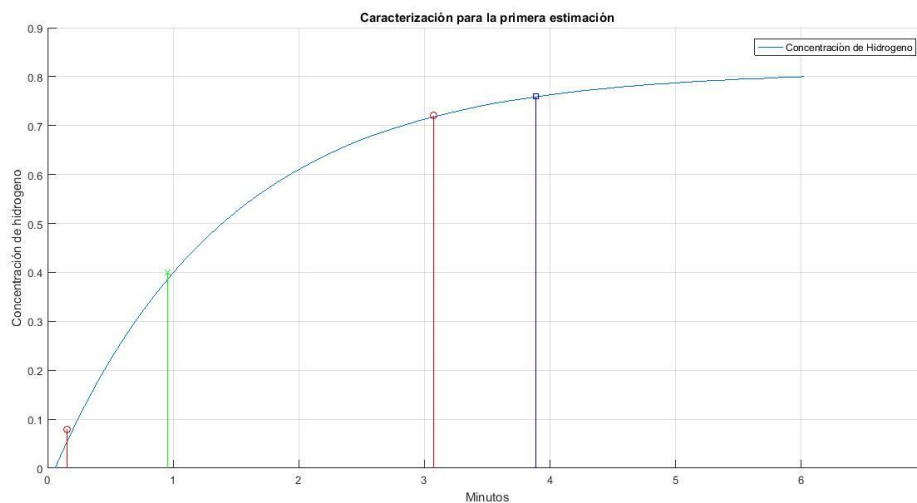


Figura 58. Criterios de desempeño para la primera estimación

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.3.2 Segunda estimación

La determinación del modelo utiliza la Ecuación 53

$$\frac{H(s)}{V(s)} = K \frac{T_Z s + 1}{T_I s + 1} \quad (53)$$

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 40.

Tabla 40

Criterios de desempeño la respuesta de la segunda estimación

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=0.93$	Tiempo de subida $t_{r10}=0.15 ; t_{r90}=3.00$ $t_r=2.85$	Tiempo de asentamiento $t_a=3.84$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.39$	$H(t_{r10})=0.06$ $H(t_{r90})=0.71$	$H(t_a)=0.75$	$H(t_f)=0.79$

En la figura 59, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para la primera estimación.

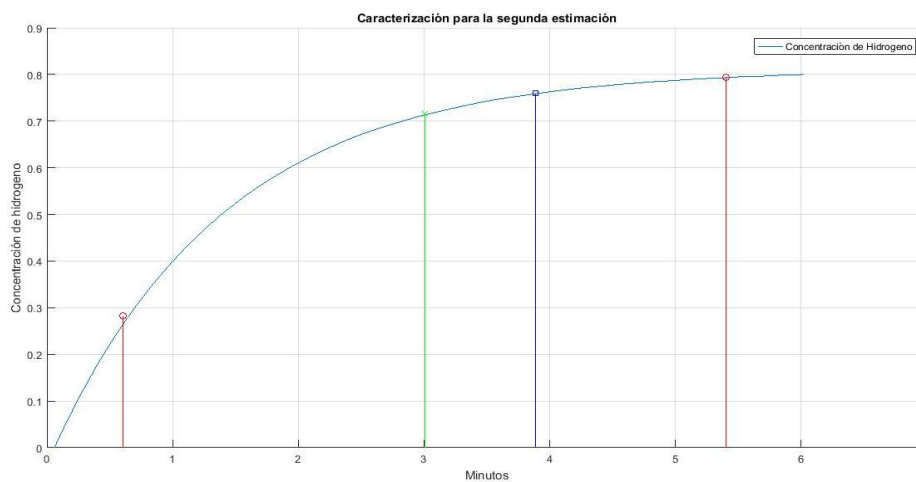


Figura 59. Criterios de desempeño para la segunda estimación

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.3.3 Tercera estimación

La determinación del modelo utiliza la Ecuación 54

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Tw)^2s^2 + 2\epsilon Tws + 1} \quad (54)$$

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 41.

Tabla 41

Criterios de desempeño la respuesta de la tercera estimación

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=3.00$	Tiempo de subida $t_r=4.79$	Tiempo de asentamiento $t_a=2.43$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.74$	$H(t_{r10})=0.20$ $H(t_{r90})=0.76$	$H(t_a)=0.72$	$H(t_f)=0.76$

En la figura 60, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para la primera estimación.

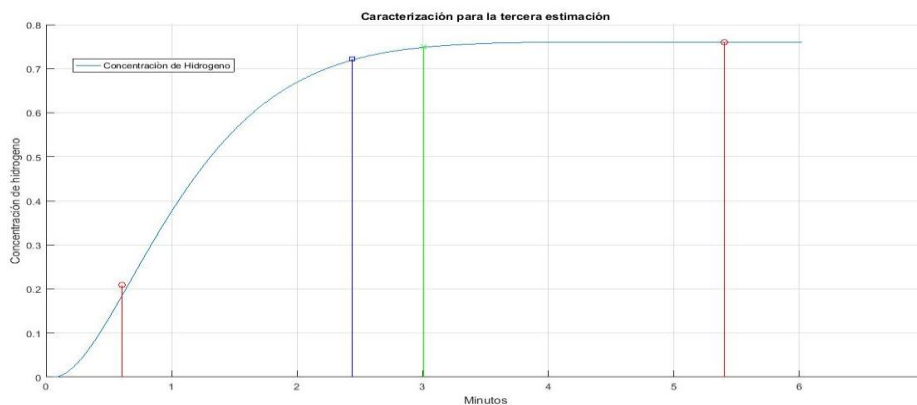


Figura 60. Criterios de desempeño para la tercera estimación

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indican el tiempo de subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.3.4 Cuarta estimación

La determinación del modelo utiliza la Ecuación 55

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K(T_z s + 1)}{(T_w)^2 s^2 + 2\epsilon T_w s + 1} \quad (55)$$

Para determinar el comportamiento de la producción de hidrógeno se utiliza los criterios de desempeño definidos en 1.12. de la tesis, resumidos en la tabla 42.

Tabla 42

Criterios de desempeño la respuesta de la cuarta estimación

	Tiempo de sobre paso máximo $T_{po}=NA$	Tiempo de retardo $t_d=3.00$	Tiempo de subida $t_r=4.79$ <small>$t_{r10}=0.60$; $t_{r90}=5.40$</small>	Tiempo de asentamiento $t_a=2.43$	Tiempo final $t_f=6.02$
% Concentración de hidrógeno	$H(T_{po})=0$	$H(t_d)=0.74$	$H(t_{r10})=0.20$ $H(t_{r90})=0.76$	$H(t_a)=0.72$	$H(t_f)=0.76$

En la figura 61, se muestra el gráfico de los criterios de desempeño de la producción de hidrógeno para la primera estimación.

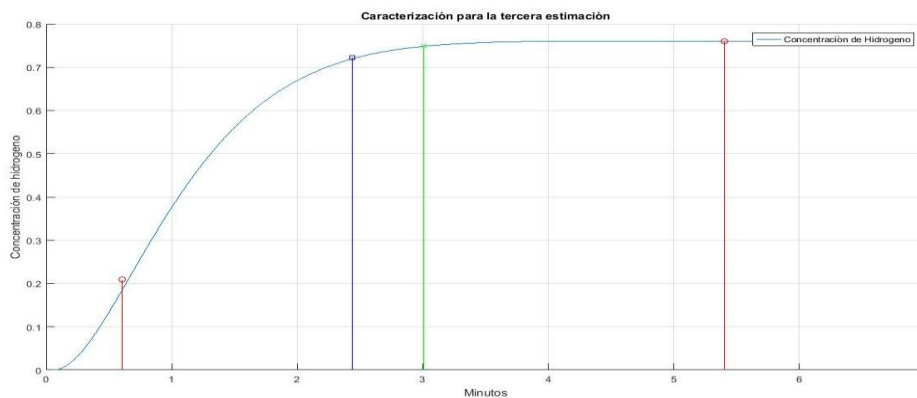


Figura 61. Criterios de desempeño para la cuarta estimación

La línea marcada de verde indica el valor del tiempo de retardo, el intervalo entre las líneas en rojo indica el tiempo subida, la línea en azul indica el tiempo de asentamiento.

4.3.5 Discusión de los resultados de la expresión matemática de la celda de hidrógeno

La tabla 43 muestra los criterios de desempeño entre los diferentes modelos estimados

Tabla 43

Criterios de desempeño entre la señal de referencia y las cuatro estimaciones

	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.33 ; t_{r90}=5.94</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
	T _{po} =NA	t _d =1.25	t _r =5.61	t _a =5.97	t _f =6.02
Señales de modelo de referencia	Concentración de hidrógeno				
	H(T _{po})=0	H(t _d)=0.40	H(t _{r10})=0.08 H(t _{r90})=0.76	H(t _a)= 0.80	H(t _f)=0.88
Primera estimación	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.15 ; t_{r90}=3.07</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K}{T_I s + 1}$	T _{po} =NA	t _d =0.95	t _r =2.91	t _a =3.88	t _f =6.02
	Concentración de hidrógeno				
	H(T _{po})=0	H(t _d)=0.39	H(t _{r10})=0.07 H(t _{r90})=0.72	H(t _a)= 0.75	H(t _f)=0.80
Segunda estimación	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.15 ; t_{r90}=3.00</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
$\frac{H(s)}{V(s)} = K \frac{T_Z s + 1}{T_I s + 1}$	T _{po} =NA	t _d =0.93	t _r =2.85	t _a =3.84	t _f =6.02
	Concentración de hidrógeno				
	H(T _{po})=0	H(t _d)=0.39	H(t _{r10})=0.06 H(t _{r90})=0.71	H(t _a)= 0.75	H(t _f)=0.79
Tercera estimación	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.60 ; t_{r90}=5.40</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K}{(T_w)^2 s^2 + 2\varepsilon T_w s + 1}$	T _{po} =NA	t _d =3.00	t _r =4.79	t _a =2.43	t _f =6.02
	Concentración de hidrógeno				
	H(T _{po})=0	H(t _d)=0.74	H(t _{r10})=0.20 H(t _{r90})=0.76	H(t _a)= 0.72	H(t _f)=0.76
Cuarta estimación	Tiempo de sobre paso máximo	Tiempo de retardo	Tiempo de subida <small>t_{r10}=0.60 ; t_{r90}=5.40</small>	Tiempo de asentamiento	Tiempo final
$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K(T_Z s + 1)}{(T_w)^2 s^2 + 2\varepsilon T_w s + 1}$	T _{po} =NA	t _d =3.00	t _r =4.79	t _a =2.43	t _f =6.02
	Concentración de Hidrógeno				
	H(T _{po})=0	H(t _d)=0.74	H(t _{r10})=0.20 H(t _{r90})=0.76	H(t _a)= 0.72	H(t _f)=0.76

Según el análisis de la tabla 43, donde se resumen los criterios de desempeño de los modelos que más se aproxima a los parámetros de caracterización de la celda de hidrógeno, el modelo el establecido en la primera aproximación, que corresponde a un sistema de primer orden y un solo polo, en comparación con la señal real

obtenemos una diferencia en el tiempo de retardo de 0.3s, la diferencia del tiempo de subida es de 2.7s, la diferencia en el tiempo de asentamiento es de 2.09s, los valores de hidrógeno para el tiempo de retardo tienen una diferencia de 0.01, los valores de hidrógeno para el tiempo subida tienen una diferencia de 0.1 y 0.04, los valores de hidrógeno para el tiempo de asentamiento tienen una diferencia de 0.05 y el valor final de hidrógeno tiene una diferencia de 0.08, para determinar el modelo matemático de esta aproximación se toma la Ecuación 56

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K}{T_I s + 1} \quad (56)$$

Despejando la ecuación 56 obtenemos la Ecuación 57.

$$(T_I s + 1)H(s) = KV(s) \quad (57)$$

Aplicando la Transformada inversa de Laplace (\mathcal{E}^{-1}) a la Ecuación 47, obtenemos la Ecuación 58

$$\mathcal{E}^{-1}(\mathcal{L}\{T_I s + 1\})H(s) = \mathcal{E}^{-1}(KV(s)) \quad (58)$$

Y finalmente se obtiene la Ecuación 59, la ecuación diferencial en el dominio del tiempo.

$$T_I \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = Kv(t) \quad (59)$$

La Ecuación 59 es la expresión matemática que representa la celda de hidrógeno incluido el sistema electrónico de potencia.

El segundo modelo que más se aproxima a la parámetros de caracterización de la celda de hidrógeno es el establecido en la segunda aproximación, que corresponde a un sistema de primer orden de un polo y uno cero, según el análisis de la tabla 43, donde se resumen los criterios de desempeño de los modelo que más se aproxima a la parámetros de caracterización de la celda de hidrógeno, , en comparación con la señal real obtenemos una diferencia en el tiempo de retardo de 0.32s, la diferencia del tiempo de subida es de 2.76s, la diferencia en el tiempo de asentamiento es de 2.13s, los valores de hidrógeno para el tiempo de retardo tienen una diferencia de 0.53, los valores de hidrógeno para el tiempo subida tienen una diferencia de 0.02 y 0.05, los valores de hidrógeno para el tiempo de asentamiento tienen una diferencia

de 0.0 y el valor final de hidrógeno tiene una diferencia de 0.09, para determinar el modelo matemático de esta aproximación se toma la Ecuación 60

$$\frac{H(s)}{V(s)} = K \frac{T_z s + 1}{T_I s + 1} \quad (60)$$

Despejando se obtiene la Ecuación 60 obtenemos la Ecuación 61

$$(T_I s + 1)H(s) = K(T_z s + 1)V(s) \quad (61)$$

Aplicando la Transformada inversa de Laplace (\mathcal{E}^{-1}) a la Ecuación 61 obtenemos la ecuación 62.

$$\mathcal{E}^{-1}((T_I s + 1)H(s)) = \mathcal{E}^{-1}(K(T_z s + 1)V(s)) \quad (62)$$

Y finalmente se obtiene la Ecuación 63, la ecuación diferencial en el dominio del tiempo.

$$T_I \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = K T_z \frac{dv(t)}{dt} + K v(t) \quad (63)$$

El tercer modelo que más se aproxima a los parámetros de caracterización de la celda de hidrógeno es el establecido en la tercera aproximación, que corresponde a un sistema de segundo orden, según el análisis de la tabla 43, donde se resumen los criterios de desempeño de los modelos que más se aproximan a los parámetros de caracterización de la celda de hidrógeno, en comparación con la señal real obtenemos una diferencia en el tiempo de retardo de 1.75s, la diferencia del tiempo de subida es de 0.82s, la diferencia en el tiempo de asentamiento es de 3.54s, los valores de hidrógeno para el tiempo de retardo tienen una diferencia de 0.34, los valores de hidrógeno para el tiempo de subida tienen una diferencia de 0.12 y 0.0, los valores de hidrógeno para el tiempo de asentamiento tienen una diferencia de 0.08 y el valor final de hidrógeno tiene una diferencia de 0.12, para determinar el modelo matemático de esta aproximación se toma la Ecuación 64.

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K}{(T_w)^2 s^2 + 2\epsilon T_w s + 1} \quad (64)$$

Despejando se obtiene la Ecuación 64 obtenemos la Ecuación 65

$$((Tw) \mid |2s^2 + 2\varepsilon Tws + 1)H(s) = KV(s) \quad (65)$$

Aplicando la Transformada inversa de Laplace (\mathcal{L}^{-1}) a la Ecuación 55 obtenemos la ecuación 66.

$$\mathcal{L}^{-1}((Tw) \mid |2s^2 + 2\varepsilon Tws + 1)H(s) = \mathcal{L}^{-1}(KV(s)) \quad (66)$$

Y finalmente se obtiene la Ecuación 67, la ecuación diferencial en el dominio del tiempo.

$$(Tw)^2 \frac{dh(t)}{dt^2} + (2\varepsilon Tw)h(t) + h(t) = Kv(t) \quad (67)$$

El cuarto modelo que más se aproxima a la parámetros de caracterización de la celda de hidrógeno es el establecido en la tercera aproximación, que corresponde a un sistema de segundo orden, según el análisis de la tabla 43, donde se resumen los criterios de desempeño de los modelo que más se aproxima a la parámetros de caracterización de la celda de hidrógeno, , en comparación con la señal real obtenemos una diferencia en el tiempo de retardo de 1.75s, la diferencia del tiempo de subida es de 0.82s, la diferencia en el tiempo de asentamiento es de 3.54s, los valores de hidrógeno para el tiempo de retardo tienen una diferencia de 0.34, los valores de hidrógeno para el tiempo subida tienen una diferencia de 0.12 y 0.0, los valores de hidrógeno para el tiempo de asentamiento tienen una diferencia de 0.08 y el valor final de hidrógeno tiene una diferencia de 0.12, para determinar el modelo matemático de esta aproximación se toma la Ecuación 68.

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K(T_zs + 1)}{(Tw)^2s^2 + 2\varepsilon Tws + 1} \quad (68)$$

Despejando se obtiene la Ecuación 58 obtenemos la Ecuación 69

$$((Tw) \mid |2s^2 + 2\varepsilon Tws + 1)H(s) = K(T_zs + 1)V(s) \quad (69)$$

Aplicando la Transformada inversa de Laplace (\mathcal{L}^{-1}) a la Ecuación 59 obtenemos la ecuación 70.

$$\mathcal{L}^{-1}((Tw) \mid |2s^2 + 2\varepsilon Tws + 1)H(s) = \mathcal{L}^{-1}(K(T_zs + 1)V(s)) \quad (70)$$



Y finalmente se obtiene la Ecuación 71, la ecuación diferencial en el dominio del tiempo.

$$(Tw)^2 \frac{dh(t)}{dt^2} + (2\varepsilon Tw)h(t) + h(t) = KT_z \frac{dv(t)}{dt} + Kv(t) \quad (71)$$

CONCLUSIONES

- Se empleó señales electrónicas en diferentes frecuencias y se mejoró la producción de hidrógeno frente a una señal continua de 5V, utilizando señales senoidales, triangulares y cuadradas en frecuencias de 10Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, 100kHz, 500kHz y 1MHz.
- Se diseñó e implementó un sistema electrónico aplicado a la celda de generación de hidrógeno que consta de una etapa de adaptación de señales y una etapa de electrónica de potencia, los valores obtenidos en los cálculos, valores simulados y valores medidos en el sistema implementado tienen menos de 0.1% de error
- Se determinó que la señal senoidal con una amplitud de 5V en el rango de frecuencia que van desde 5kHz hasta lo 50kHz produce la mayor cantidad de hidrógeno, puntualmente a una frecuencia de 50kHz con un valor de 2.22 de hidrógeno, la segunda señal con mayor producción de hidrógeno es la triangular con una amplitud de 5V a 10kHz con un valor de 1.93 de hidrógeno, la tercera señal con mayor producción de hidrógeno fue la señal continua con amplitud de 5V con un valor de 1.52 de hidrógeno, por último la señal cuadrada con una amplitud de 5V a 500kHz es de 1.43, siendo la de mejor producción.
- Se determinó la expresión matemática que relaciona la generación de hidrógeno con la señal electrónica, es la ecuación diferencial de primer orden $T_I \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = Kv(t)$, la cual presenta los criterios de desempeño más cercanos a los valores reales obtenidos experimentalmente.



RECOMENDACIONES

- Recomendamos el uso de señales senoidales con frecuencias en el intervalo de 5kHz a los 50kHz para la producción de hidrógeno.
- Recomendamos el uso de fuentes alternativas de energía como el hidrógeno.
- Recomendamos mayor énfasis en las investigaciones de energías alternativas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, Ma., & Finn, Edward, J. (1976). *Física I*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=5Sy0xQEACAAJ>
- Américo, H., & Visintin, A. (2010). Hidrógeno, Combustible Del Futuro: ¿Por Qué, Cómo Y Dónde? *Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas*, 1–9.
- Carvajal-Osorio, H., Babativa, J. H., Alonso, J. A., Competitividad, I., Valle, U., & Valle, U. (2010). *Estudio sobre producción de H₂ con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia Study of H₂ production by hydroelectricity for a Hydrogen economy in Colombia*. 12(1), 31–42.
- Electrolysis of Water and Fuel Cell Operation. (2019). Recuperado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/electrol.html>
- Fernández, C. J. J., & Mora, C. L. De. (2010). *Prácticas Obligatorias De Laboratorio Electronic Design Methodology in Lab Experiments*. 19–27. Recuperado de www.sav.us.es/pixelbit/pixelbit/articulos/n37/2.pdf
- Giancoli, D. C. (1997). *Física*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=osTsQwAACAAJ>
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2001). *Fundamentos de física*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=GqkuPwAACAAJ>
- Hortal, M. A., & Barreras, M. A. H. A. L. M. (2005). *El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado: una introducción al estudio del hidrógeno como vector energético*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=v5kSrxNSKEQC>

- Identificaci, L. (1994). *Tema 1 Introducción a la Identificación de sistemas dinámicos*
1.1 *La Identificación como herramienta para la modelización de sistemas dinámicos.*
- Inc., E. T. S., Inc, E. T. S., & of Energy, U. S. D. (2016). *Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=S9GZDAEACAAJ>
- Ingle, V. K., & Proakis, J. G. (2011). *Digital Signal Processing Using MATLAB*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=m-yFotJKIEMC>
- Kotte, S. K., Tech, R. y M., Ahad, A., & A., S. babu. (2011). *Dynamic Modeling and Simulation of a Wind Fuel Cell Hybrid Energy System for Standalone Systems with Hybrid Optimization Model For Electrical Renewable*.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=GyWr6cT8SEsC>
- Larousse, P., Augé, C., & de Toro, M. (1912). *Pequeño Larousse ilustrado: nuevo diccionario enciclopédico*. Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=0FcDAAAAMAAJ>
- Miyara, F. (2004). Senoidales. *Argentina, Segunda Ed*(ELECTRÓNICA DE POTENCIA III), 49. Recuperado de <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3>
- Myla, M. (2013). *Myla Madson ' s Complete Guide To : Building and Installing a Hydrogen Generator*.
- Oppenheim, A. V, Willsky, A. S., Nawab, S. H., & Hernández, G. M. (1998). *Señales y sistemas*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=g2750K3PxRYC>
- Pons, Muzzo, G., & Binda, Arana, D. (1976). *Compendio de Química General-Organica-Inorganica*.
- Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2007). *Tratamiento digital de señales*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=8rhdNQAACAAJ>
- Romero, J. (2018). *Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción*. 134. Recuperado de <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31495/TFG-I-929.pdf;jsessionid=A26BA53F15FBA2352834CF31E42931D5?sequence=1>



- Sharpe, A. G. (1998). *Química inorgánica*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=q1iWMtPDuOMC>
- Shenoi, B. A. (2005). *Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design*. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?id=37g8oUqaS_AC
- Soto Chirinos, E. S., & Huanca Coa, A. C. (2014). *Diseño e implementación de un prototipo eliminador de la bacteria Helicobacter Pylori por medio de frecuencias aplicado a cultivos de cepas*.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2004). *Física 1a - Para La Ciencia y La Tecnología Mecánica*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=NPL4Td-LSBYC>
- Wark, K., & Richards, D. E. (2000). *Termodinámica*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=zyRUPAAACAAJ>
- Weeks, M. (2007). *Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=rLqQYPqa82YC>
- Young, H. D., Freedman, R. A., Sears, F. W., Flores, V. A. F., Ford, A. L., & Zemansky, M. W. (209AD). *Física universitaria 01*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=msJzQwAACAAJ>



ANEXOS

Anexo 1. Hoja de datos del sensor de hidrógeno

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	ACOR DC
P _L	Load resistance	10K Ω	
R _H	Heater resistance	31 ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than800mW	

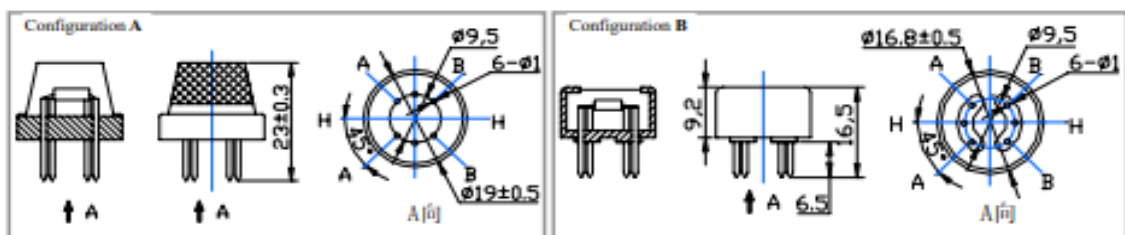
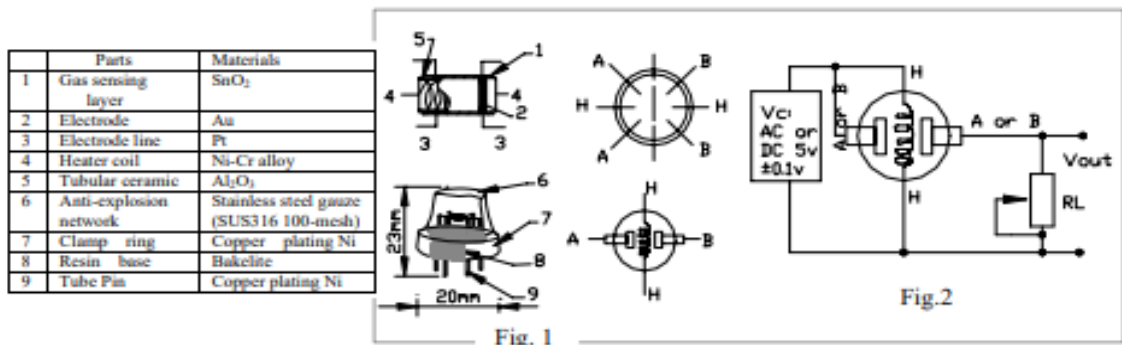
B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Tao	Using Tem	-10℃-50℃	
Tas	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	

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℃ ± 2℃ 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

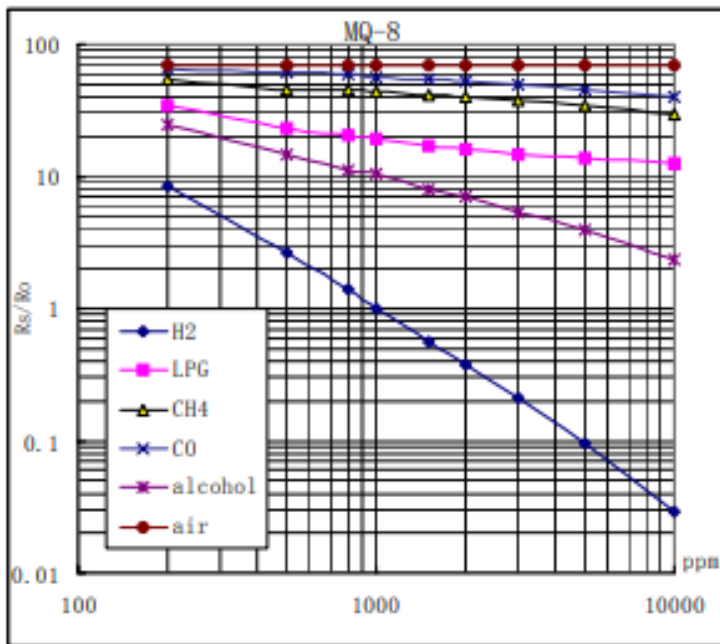


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-8

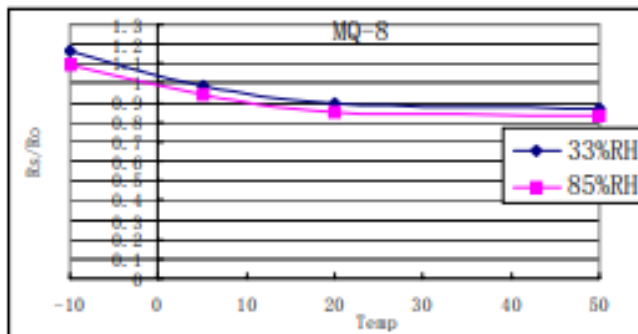


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-8 on temperature and humidity.
 R_0 : sensor resistance at 1000ppm of H_2 in air at 33%RH and 20 degree.
 R_s : sensor resistance at 1000ppm of H_2 in air at different temperatures and humidities.

SENSIVITY 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 2. Fotos del sistema implementado



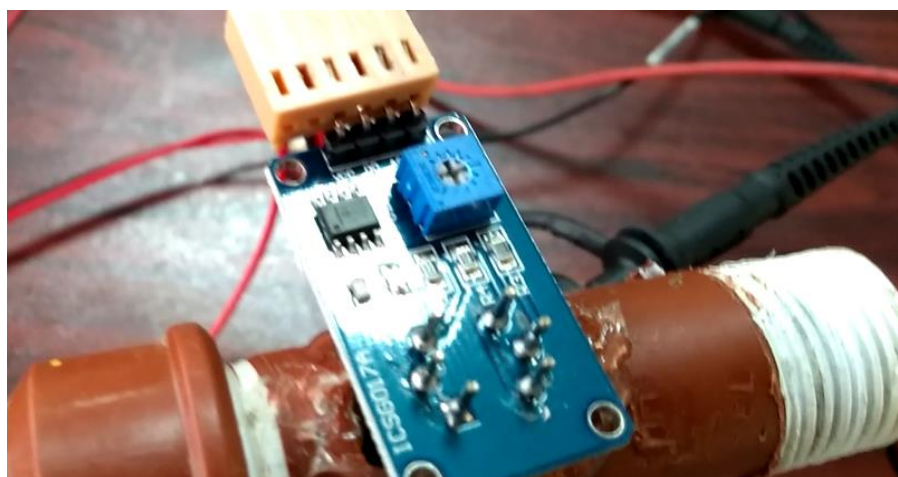
Sistema implementado



Celda de hidrógeno



Sistema de potencia



Sensor de hidrógeno

Anexo 3. Código fuente para la caracterización de señales

```
%Código de determinación de características de las señales

clc

Hmax=max(H);
Hmin=min(H);
Htotal=Hmax-Hmin;

%Valor para el tiempo de retardo
Htd1=((Htotal*50)/100);
Htd=Htd1+Hmin;

for k=1:2000
    if H(1,k) >=Htd
        td(1,k)=100;
    else
        td1(1,k)=k;
    end
end

tad1=max(td1);
tad=tad1*6/2000 %TIEMPO DE RETARDO NORMALIZADO
Htd=H(1,tad1) %VALOR DEL HIDRÓGENO EN EL TIEMPO DE RETARDO
%tad=tad1/0.67;
%tad=tad/100

%Valor para el tiempo de subida al 10%
Htr10=((Htotal*10)/100);
Htr1=Htr10+Hmin;

for k=1:2000
    if H(1,k) >=Htr1
        tr(1,k)=100;
    else
```



```
        tr1(1,k)=k;
    end
end
tr10=max(tr1);
trd10=(tr10*6)/2000;
H(1,tr10);
%tad=tad1/0.67;
%tad=tad/100

%Valor para el tiempo de subida al 90%
Htr90=((Htotal*90)/100);
Htr9=Htr90+Hmin;

for k=1:2000
    if H(1,k) >=Htr9
        tra(1,k)=100;
    else
        tr9(1,k)=k;
    end
end
tr90=max(tr9);
trd90=(tr90*6)/2000;
H(1,tr90);
%tad=tad1/0.67;
%tad=tad/100

tr=((tr90-tr10)*6)/2000)
Htr10=H(1,tr10)
TR10=((tr10*6)/2000)
Htr90=H(1,tr90)
%tiempo asentamiento
TR90=((tr90*6)/2000)
```



```
Hts=Hmax-((Hmax*5)/100);  
%Htd=Htd1+Hmin;  
  
for k=1:2000  
    if H(1,k) >=Hts  
        td(1,k)=100;  
    else  
        ts1(1,k)=k;  
    end  
end  
ts1=max(ts1);  
tas=(ts1*6)/2000  
Htas=H(1,ts1)  
%tad=tad1/0.67;  
%tad=tad/100  
  
%Graficador de caracterización de las señales  
  
close all  
figure;  
%t=T*(6/1999);  
t=T/0.67;  
grid;  
hold on;  
%axis([0 6.5 0 1.6])  
plot(t/100,H)  
xlabel('Minutos')  
ylabel('Concentración de hidrógeno')  
title('Caracterización Hidrógeno Señal continua')  
legend('Concentración de Hidrógeno' )  
  
stem(tad,Htd,'x','g')%marcar el tiempo de retardo td 50%  
stem(TR10,Htr10,'o','r')%marcar tiempo al 10%  
stem(TR90,Htr90,'o','r')% marcar el tiempo al 90%
```



```
stem(tas,Htas,'s','b')%para el tiempo asentamiento  
Hfinal=H(1,2000)
```

Anexo 4. Código fuente para la estimación de señales

```
%para el primer modelo  
clc  
PVEC = getpvec(Plant8)  
K= PVEC(1,1)  
Tp1=PVEC(2,1)  
Tp2=PVEC(3,1)  
Tz=PVEC(4,1)  
numerador=[K*Tz K ]  
polo1=[Tp1 1]  
polo2=[Tp2 1]  
denominador=conv(polo1,polo2)  
%denominador=[Tp1 1]  
HH=tf(numerador,denominador)  
yes=lsim(HH,V,T);  
figure  
plot(yes)  
hold on  
Hes=H-0.68;  
plot(Hes)  
yes=yes';
```