



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“PROPUESTA DE UN LAZO DE CONTROL PARA LA EVALUACIÓN
DE LA CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO EN UN SISTEMA
MODULAR DE UN PROCESO DE ELECTRÓLISIS”**

TESIS PROFESIONAL

PRESENTA:

KARLA MARGARITA LÓPEZ PÉREZ

PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

ASESOR DE TESIS:

DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

JUNIO 2018

Registro de tesis



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/782/2017
Asunto: Registro de Tema de Tesis

C. KARLA MARGARITA LÓPEZ PÉREZ
PASANTE DE LA LICENCIATURA
EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE:

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

**"PROPUESTA DE UN LAZO DE CONTROL PARA LA EVALUACIÓN DE LA
CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO EN UN SISTEMA MODULAR DE UN PROCESO
DE ELECTRÓLISIS"**

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

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

ATENTAMENTE
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., 14 de Septiembre del 2017


M.L.C. MA. GPE. TITA VÁZQUEZ E. DE LOS MONTEROS
SECRETARIA ACADÉMICA



C.e.p. Director de Tesis: Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre
C.e.p. Archivo.

80 AÑOS
DE UNIVERSIDAD

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00
Ext. 7250 y 7251

A

Dedicatoria

*A mis padres,
mis logros son de ellos.*

Agradecimientos

A mis padres Martha y Margarito, por brindarme en todo momento su apoyo incondicional, siendo ejemplos de superación y perseverancia.

A mi hermano Carlos, quién ha sido mi mano derecha y un ejemplo a seguir toda la vida y por confiar siempre en mí.

Al Dr. Pacheco, quién me ha enseñado a que puedo lograr mis metas y lo que me proponga. Gracias por sus conocimientos y por incentivar me a seguir adelante.

A Graciela, Rodrigo, Alan e Israel por ser parte fundamental para la realización del trabajo, ya que siempre que caía, ellos estaban presentes para levantarme.

A la institución y profesores por la formación

Índice general

Registro de tesis.....	2
Resumen	1
Introducción	2
Planteamiento del problema	4
Justificación	4
Hipótesis.....	4
Objetivos.....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	5
Capítulo 1	6
<i>Marco teórico y antecedente</i>	6
Hidrógeno	6
Electrólisis.....	7
Reactores de celdas electrolizadoras.....	9
Peligros del hidrógeno.....	10
Capítulo 2	21
<i>Metodología</i>	21
Metodología del objetivo específico 1.....	21
Metodología del objetivo específico 2.....	22
Metodología del objetivo específico 3.....	23
Metodología del objetivo específico 4.....	23
Metodología del objetivo específico 5.....	24
Metodología del objetivo específico 6.....	25
Capítulo 3	27
<i>Resultados</i>	27
Equipo de monitoreo portátil	43
Conclusión.....	46
Bibliografía.....	48

Índice de figuras

Figura 1. Métodos de obtención de hidrógeno.	7
Figura 2. Separación de la molécula del agua en los electrodos.....	8
Figura 3. Voltámetro de Faraday.....	9
Figura 4. instalación de un reactor de celdas secas.....	10
Figura 5. Límites de inflamabilidad y detonación de varios gases.	11
Figura 6. Gráfico de Shapiro y Moffette.....	12
Figura 7. Elementos de un SIS	15
Figura 8.. Relevador a dos manos.	16
Figura 9. Variación de la presión con venteo y sin venteo dentro de un sistema cerrado.	19
Figura 10. Metodología para el desarrollo del presente trabajo.....	21
Figura 11. Metodología del objetivo específico 1.	22
Figura 12. Desarrollo del objetivo específico 2.....	23
Figura 13. Desarrollo del objetivo específico 3.....	23
Figura 14. Desarrollo del objetivo específico 4.....	24
Figura 15. Desarrollo del objetivo específico 5.....	25
Figura 16. Desarrollo del objetivo específico 6.....	25
Figura 17. Sistema modular de reactores.	27
Figura 18. Dimensiones del sistema modular.	28
Figura 19. Soporte para los reactores de celda seca.	29
Figura 20. Reactor de celda seca.	30
Figura 21. Partes del reactor de celda seca.....	31
Figura 22. Sensor MQ-8.	32
Figura 23. Interior del sensor M-8.	33
Figura 24. Placa Arduino Mega.....	33
Figura 25. Parte inferior del sensor MQ-8.	34
Figura 26. Ventilador.....	34
Figura 27. Conexión entre batería, relevador, ventilador y Arduino.....	35
Figura 28. Conexión de los elementos del lazo de control.	35
Figura 29. Código del sensor MQ-8.	37
Figura 30. Código de los relevadores.	37
Figura 31. Código para almacenar información de los sensores.....	38
Figura 32. Panel de control en LabVIEW.	38
Figura 33. Curvas de gases para el sensor MQ-8.....	39
Figura 34. Dimensiones del sensor MQ-8.....	42
Figura 35. Movimiento del sensor.	43
Figura 36. Conexión entre la placa Arduino y la pantalla táctil.	44
Figura 37. Conexión entre los elementos del equipo portátil.....	45

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Propiedades del hidrógeno.</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2. Sensores de hidrógeno.</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3. Características técnicas de la placa Arduino Mega 2560.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4. Valores de concentración y de resistencia para el gas hidrógeno.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 5. Conexión entre pines de la placa Arduino y la pantalla táctil.</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6. Sensores para el equipo de monitoreo.</i>	<i>45</i>

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un sistema de monitoreo y control de las emisiones de hidrógeno debidas a fallas estructurales y/o de proceso que se puedan producir en la sección principal en el prototipo propuesto por Pacheco *et al.* en 2016 desarrollado en la Facultad de Ingeniería Química, en este equipo, el objetivo es estudiar la factibilidad de la implementación del gas hidrógeno generado a partir del proceso de electrólisis en reactores de celdas seca y electrolito alcalino, así como la búsqueda de la minimización de los riesgos que representa la producción, el transporte y el almacenamiento del gas hidrógeno.

En este sentido, el objetivo general de este trabajo consiste en el desarrollo e implementación de un sistema de control conformado por un lazo de control cerrado que permitirá la detección y mitigación de fugas de hidrógeno en el módulo. Es importante su implementación, debido a que el hidrógeno es un gas incoloro e inodoro y por estas características se dificulta su detección sensorial, además, el hidrógeno es un gas altamente peligroso porque tiene un amplio rango en sus límites de inflamabilidad.

Por lo anterior, si los sensores detectan una concentración límite de hidrógeno dentro del módulo, se activarán las medidas correctivas que están conformadas por el sistema de venteo y la interrupción de la energía eléctrica de los reactores para evitar riesgos en el módulo. Dicho lazo reducirá el tiempo de respuesta a emergencia sin la necesidad de exponer a un usuario, se mejorará la eficiencia del proceso, ya que se evitarán pérdidas del producto y se evitará el riesgo de ignición y explosión del hidrógeno, asegurando la integridad física de los operadores.

Introducción

Actualmente, se realizan investigaciones para estudiar la eficiencia del hidrógeno como combustible, destacando el estudio de los procesos de obtención del gas de forma sustentable. El problema común de los procesos en los que se maneja hidrógeno es el alto riesgo de explosión del gas, debido a que el hidrógeno es altamente inflamable con una mínima energía de ignición, es por esto que en los procesos se implementa los sistemas de detección de fugas de gases.

De acuerdo a la Autoridad *Británica Health and Safety Executive* el 44 % de los accidentes industriales se deben a la deficiencia de los instrumentos de seguridad y un 6 % suceden durante el arranque de la planta, es por ello que se desarrollaron las normas internacionales de seguridad. Por consiguiente, se demandan estrictos criterios para la incorporación de medidas de seguridad para reducir y/o prevenir el riesgo de operación de una planta, entre ellas la implementación de un sistema instrumentado de seguridad (SIS).

Los SIS ejecutan acciones automáticas para monitorear valores y parámetros de un proceso dentro de los límites de operación y, al presentarse condiciones de riesgo, éstos deben generar alarmas y paros de emergencia del proceso hasta llevarlo a un estado seguro. Uno de los SIS más significativos de una planta, es el sistema de detección de gases, debido a que los gases no se detectan sensorialmente por lo que una fuga no detectada puede generar incendios, explosiones y/o intoxicaciones.

La finalidad de los sistemas de detección de gases y vapores es proteger la integridad física de los trabajadores, proteger inmuebles y el medio ambiente y activar medidas correctivas y preventivas antes de que se genere una situación peligrosa. En una zona potencialmente afectada por gases peligrosos depende principalmente de la fiabilidad del sistema de detección y especialmente de los sensores manipulados, los cuales deben situarse en lugares estratégicos del proceso o de la planta, sobre todo, en los lugares más propensos de fugas o de acumulación de gases. Estos sensores deben conectarse a una unidad de control, el cual debe de encontrarse en zonas seguras, y que presente un informe sobre las concentraciones del gas a monitorear, las alarmas de emergencia y los registros de los datos. Además, dicho sistema deberá realizar acciones como cerrado de válvulas, apagado de la electricidad, encendido de ventiladores o extractores, alarmas visuales y auditivas, entre otras actividades.

Capítulo 1

Marco teórico y antecedentes

Planteamiento del problema

En la Facultad de Ingeniería Química se estudia el proceso de la obtención de gases de H_2 y O_2 por medio de la electrólisis del agua en un sistema modular conformado por reactores de celdas secas. Actualmente, el proceso no cuenta con un sistema de control automático y de verificación que permita detectar fugas de H_2 en los reactores para garantizar una operación segura, dicha verificación y la realización de las medidas correctivas son llevadas a cabo por los operadores de manera directa, es decir, se debe de examinar cada reactor para localizar la fuga, pero este proceso es lento porque la detección sensorial de ambos gases es nula.

Justificación

El proceso de la obtención de gases de H_2 y O_2 por medio de la electrólisis del agua realizado en la Facultad de Ingeniería Química necesita la implementación de un lazo de control, el cual permitirá la detección de fugas de H_2 dentro del sistema modular en tiempo real, evitando un ambiente con alto riesgo de inflamabilidad y explosividad. El lazo de control es automatizado para incrementar su eficiencia reduciendo el tiempo de respuesta a emergencia activando las medidas correctivas conformadas por válvulas de entrada de agua, válvulas de salida de los gases y el sistema de venteo para mitigar el peligro del sistema sin la necesidad de exponer a un usuario, logrando una operación segura, así como la eliminación de la pérdida del producto y manteniendo los reactores operando por un tiempo indefinido.

Hipótesis

La implementación de un sistema de control automático desarrollado específicamente para el equipo modular de producción de H_2 y O_2 gaseoso por electrólisis propuesto por Pacheco *et al.* en 2016, permitirá la detección de fugas de H_2 minimizando la pérdida del producto y disminuyendo el riesgo de inflamabilidad y explosión del gas por medio de medidas correctivas.

Objetivos

Objetivo general

Proponer un sistema de control automático que permita la evaluación de la concentración de hidrógeno en un sistema modular de un proceso de electrólisis.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el sistema modular de la producción de hidrógeno propuesto por Pacheco *et al.* en 2016 para determinar el funcionamiento del equipo.
2. Selección y configuración del sensor de detección de hidrógeno y el hardware del lazo de control.
3. Configurar un lazo de control para la evaluación de la concentración de hidrógeno en aire.
4. Programación de los protocolos y del controlador lógico programable del sensor de evaluación.
5. Calibración y pruebas de funcionamiento.
6. Implementación del sistema de control en el equipo.

Marco teórico y antecedente

Hidrógeno

El hidrógeno (H_2) en condiciones normales de temperatura y presión, es un gas diatómico, incoloro, inodoro, insípido y altamente inflamable. En la Tabla 1 se muestran algunas propiedades del hidrógeno (Darkrim-Lamari, 2008).

Tabla 1. Propiedades del hidrógeno.

Propiedades	Unidades	Valor
Peso atómico	<i>Da</i>	1.00974
Densidad (1 atm, 20 °C)	<i>Kg m⁻³</i>	0.0838
Viscosidad	<i>g cm⁻¹ s⁻¹</i>	0.083
Temperatura de autoignición	°C	572
Límite de inflamabilidad	<i>% volumen</i>	4 – 75
Coeficiente de difusión en el aire	<i>cm² s⁻¹</i>	0.61
Velocidad de sonido (1 atm, 25 °C)	<i>m s⁻¹</i>	1308
Energía mínima de ignición	<i>mJ</i>	0.017
Distancia de enfriamiento	<i>mm</i>	0.64
Relación de mezcla teórica	<i>% volumen</i>	29.53
Velocidad de combustión	<i>m s⁻¹</i>	2.65
Temperatura de la flama en aire	°C	2045
Contenido de energía por unidad de masa	<i>MJ kg⁻¹</i>	119 - 141

El estudio del H_2 se remonta al año 1671 por Robert Boyle, quien describió la reacción que se producía entre limaduras de hierro y ácidos diluidos, y que generaba hidrógeno gaseoso (Okano, 2016). En 1776, Henry Cavendish fue el primero en identificar al H_2 recogéndolo sobre una reacción de mercurio con ácidos y lo describió como un “aire inflamable de metales”, observando que en la combustión del gas se formaba agua. Finalmente, en 1783, Lavoisier bautizó a este elemento con el nombre de hidrógeno, debido a que arde en presencia de oxígeno para formar agua (AFHYPAC, 2011).

En la naturaleza el H_2 se encuentra libre en pequeñas proporciones, además, de formar parte esencial en todos los hidrocarburos (C_nH_n), de sustancias orgánicas y constituir principalmente el agua (H_2O); siendo este último elemento una excelente materia prima para la obtención del H_2 , teniendo en cuenta su abundancia ya que constituye el 71 % de la masa del planeta (Abdel-Aal, 2015). Actualmente, existen diversos procesos para la producción de H_2 . En la Figura 1 se muestran los métodos principales para la obtención del hidrógeno, destacando el proceso de electrólisis debido a que se necesita menos energía, la materia prima es agua y los productos del proceso son O_2 e H_2 (Naterer, Dincer, & Zamfirescu, 2013).

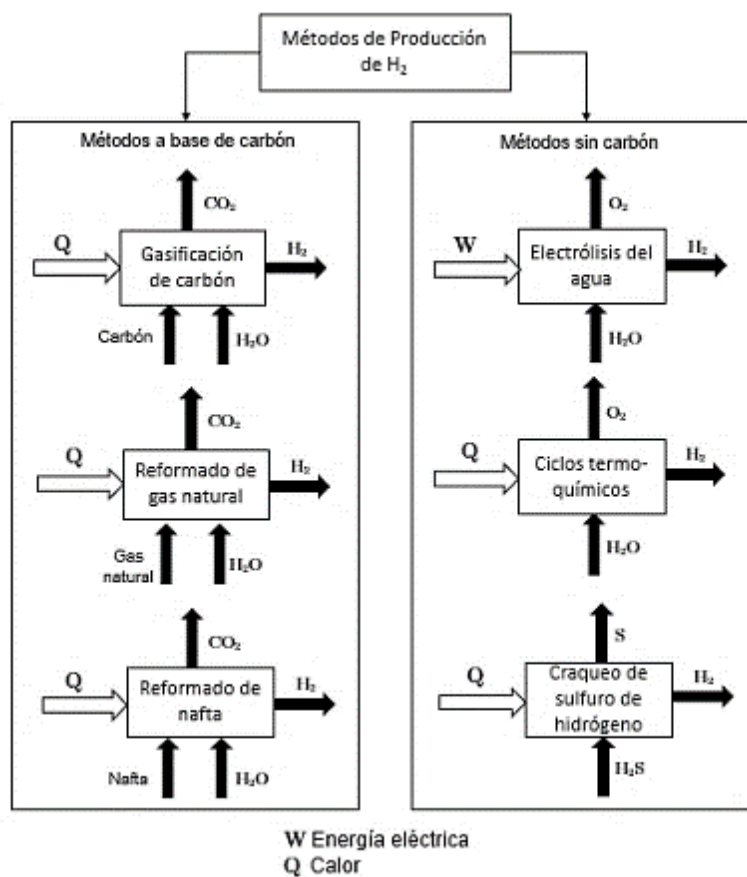


Figura 1. Métodos de obtención de hidrógeno.

Electrólisis

La electrólisis es el proceso de separar los átomos que constituyen la molécula del agua por medio de una corriente eléctrica a través de un cátodo y un ánodo (hechos de un metal

inerte como el platino o el acero inoxidable), en donde, el H₂ aparecerá en el cátodo y el O₂ aparecerá en el ánodo. Para optimizar la producción de H₂ y O₂ se varía la composición del agua con la adición de un electrolito para aumentar la velocidad de reacción, éste puede ser un ácido, una base o una sal. En la Figura 1 se muestra el proceso de electrólisis del agua por medio de electrodos (Gutiérrez, 2005).

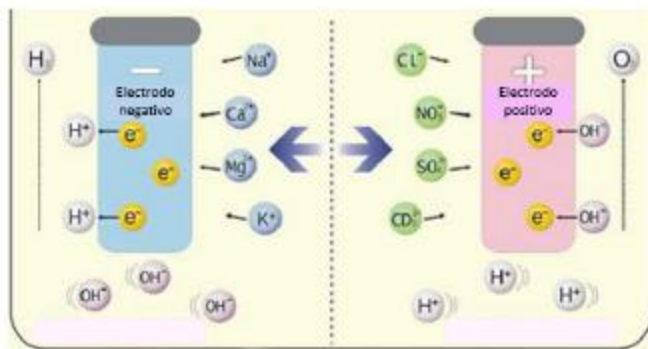
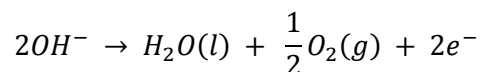


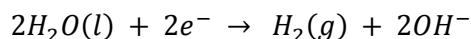
Figura 2. Separación de la molécula del agua en los electrodos.

Las reacciones fundamentales que hacen la electrólisis posible son (Ito, Li, & Hao, 2011):

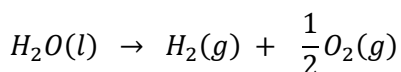
Reacciones en el ánodo:



Reacciones en el cátodo:



Reacción general:



Dutchmen Adriaan Paets van Troostwijk y Jan Rudolph Deiman observaron la separación de la molécula del agua en una mezcla de “aire combustible” causada por descargas eléctricas en 1789. En el año 1800 por los químicos Nicholson y Sir Carlisle, quienes construyeron una pila eléctrica con el fin de mejorar la conexión eléctrica conectando los electrodos de la pila a un recipiente de agua en donde notaron la presencia de hidrógeno y oxígeno en cada terminal procedentes de la separación de la molécula del agua. Faraday en 1832 realizó una serie de experimentos con el objetivo de estudiar la naturaleza

fundamental de la electricidad, además de introducir las leyes de electrólisis y de inducir los términos de ánodo y cátodo (Lehner, 2014). En la Figura 2 se muestra el voltámetro empleado por Faraday en la electrólisis del agua en donde el oxígeno y el hidrógeno se formaban en los electrodos (EPEC).



Figura 3. Voltámetro de Faraday.

Por otra parte, la electrólisis es un proceso poco eficiente partiendo de que la energía eléctrica es costosa, sin embargo, se han diseñado prototipos de celdas electrolizadoras para reducir los costos en la producción de H_2 y O_2 con la utilización de energías renovables.

Reactores de celdas electrolizadoras

En un reactor de celdas electrolizadoras, la electricidad provoca la disociación del agua en moléculas de hidrógeno y oxígeno. La corriente eléctrica pasa entre dos electrodos separados por un electrólito, produciendo hidrógeno en el cátodo (electrodo negativo) y oxígeno en el ánodo (electrodo positivo). El H_2 producido es dos veces el volumen del O_2 y puede ser utilizado inmediatamente o almacenado. (International Standard, 2011) Los reactores de celda se clasifican en dos: celda húmeda y celda seca.

El reactor de celda húmeda o sumergible es un contenedor de plástico o de acrílico lleno de agua con un electrólito, en donde los electrodos (espirales, placas o tubos) de acero inoxidable, cobre o níquel; se encuentran totalmente sumergidos. Al aplicar la corriente eléctrica a los electrodos el gas oxihidrógeno (mezcla de gases de H_2 y O_2) asciende a través del contenedor y escapa por la parte superior.

Por otra parte, el reactor de celdas secas no se sumerge en un recipiente ya que la misma celda es el contenedor. Las celdas secas tienen un número de configuraciones diferentes de las placas que varían de acuerdo a la función configurada, estas placas pueden ser positivas, negativas o neutras (no hay conexión con los electrodos). En la Figura 2 se puede observar un esquema de la instalación de un reactor de celdas secas que hace uso de la energía solar.

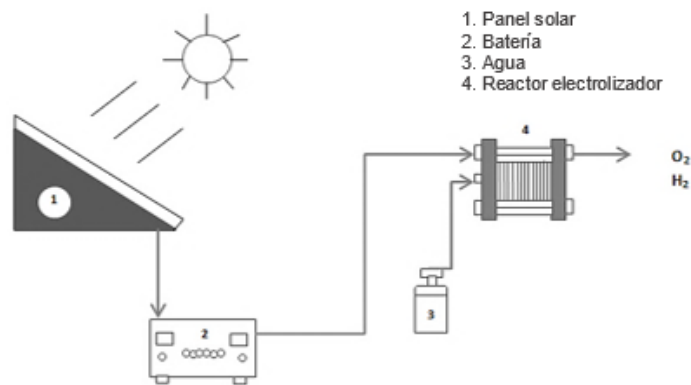


Figura 4. instalación de un reactor de celdas secas.

En 1959, Francis Thomas Bacon fue el primer ingeniero en desarrollar una celda doble con una unidad para la generación de H_2 y O_2 , y la otra actuando como pila de combustible. De esta manera la pila era reversible, lo que le permitía actuar tanto como un electrolizador y/o como una pila. Los problemas surgieron debido a que dentro de estas celdas se generaba unas pequeñas explosiones a causa de la generación de una mezcla altamente inflamable y a las constantes fugas de H_2 por las deformaciones de tuberías, sellos o por la falla en válvulas de entrada y salida, entre otros; provocando daños en los materiales del equipo (Editors of Encyclopædia Britannica, 2018).

Peligros del hidrógeno

El H_2 por sí sólo no es explosivo, es una molécula estable, pero para que arda se necesitan tres condiciones: 1) que se mezcle con una sustancia oxidante, 2) se necesita de una fuente de ignición y 3) la mezcla deberá estar dentro de los límites de inflamabilidad. Los límites de inflamabilidad delimitan las concentraciones mínimas y máximas de un gas combustible en una mezcla con el aire para hacerla inflamable. Estos límites se expresan en tanto por ciento en volumen de mezcla gas combustible-aire. De acuerdo a las condiciones que tenga

el gas combustible de confinamiento, concentración y la intensidad de la fuente de ignición; varía la velocidad y la energía emitida de la combustión y es probable que ocurra una explosión, por esto también recibe el nombre de límites de explosividad.

El límite inferior de inflamabilidad o explosividad (LII o LIE) es la concentración mínima del gas combustible en el aire que bajo condiciones estandarizadas puede inflamarse, por debajo del cual no existe propagación de la llama al contacto con una fuente de ignición. Por el contrario, el límite superior de inflamabilidad o explosividad (LSI o LSE) es la concentración máxima del gas combustible, que por encima de este no hay una propagación de la llama. El LIE y el LSI del H₂ en el aire a una presión de 101.3 kPa y a una temperatura de 298 °K es del 4 y 75.6 % en volumen, respectivamente. Para el caso del hidrógeno-oxígeno es de 4.1 y 94 %, respectivamente (NFPA, 2007). El hidrógeno es el gas con el rango más amplio de inflamabilidad y detonación, en la Figura 5 se comparan los límites de inflamabilidad del hidrógeno, el metano y el propano (Sasaki, et al., 2016).

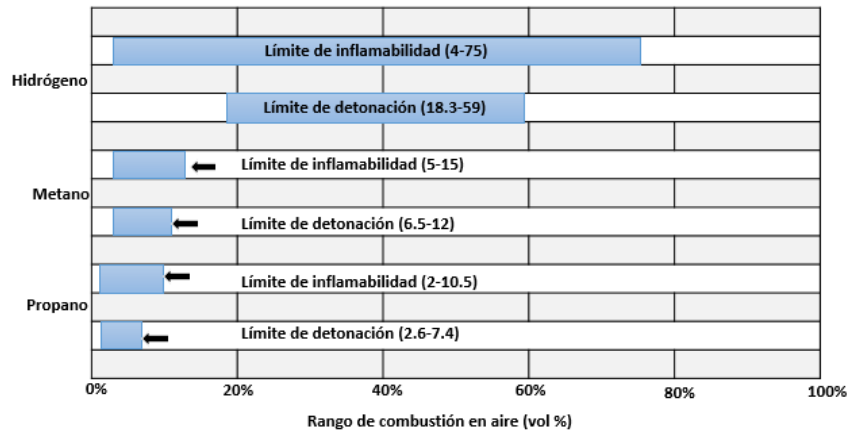


Figura 5. Límites de inflamabilidad y detonación de varios gases.

El límite de inflamabilidad cambia si se diluye con otro gas como el dióxido de carbono. En la Figura 3 se muestra el gráfico de Shapiro y Moffette en donde se define las regiones de inflamabilidad del hidrógeno: aire: mezclas diluyentes (Inoue, 2016).

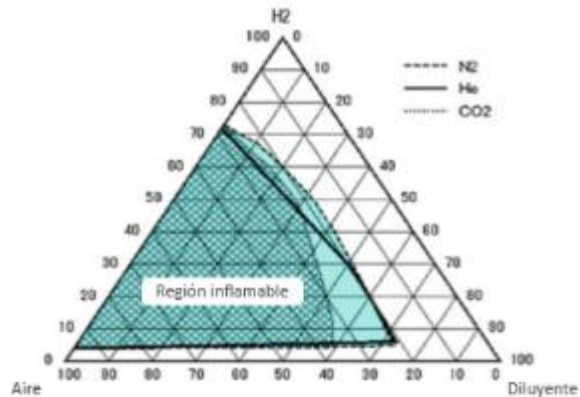


Figura 6. Gráfico de Shapiro y Moffette.

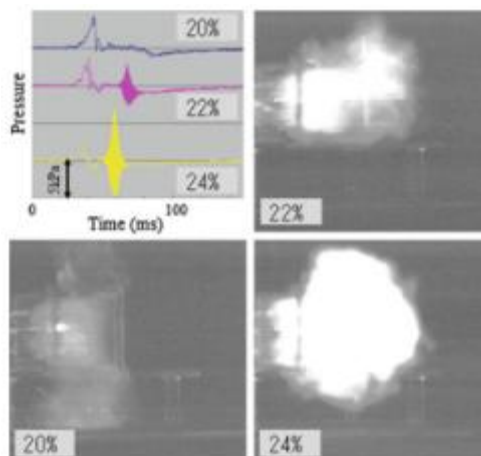
Las propiedades que hacen al H_2 ser altamente inflamable son: tener baja viscosidad y un pequeño tamaño de molécula; razón clave para ser propenso a fugas a través de materiales porosos, accesorios o sellos. Bajo condiciones ambientales normales (1 atm y $20\text{ }^\circ\text{C}$) el H_2 tiene una densidad 0.0838 kg m^{-3} y una gravedad específica de 0.0696 (aire=1), por lo tanto, el H_2 es 14 veces menos denso que el aire por lo que es el gas más ligero. Su elevada flotabilidad afecta el movimiento del gas más que su alta difusividad en el caso de fugas del H_2 gaseoso. Además, el H_2 tiene una mínima energía de ignición de 0.017 mJ , lo cual lo hace un gas altamente inflamable debido a su facilidad de ignición; y su velocidad de ignición es de 2.65 m s^{-1} , pero bajo condiciones de turbulencia, los gases se queman más rápido y la presión aumenta (International Organization for Standardization, 2004).

En 1937, el accidente del zepelín de Hindenburg fue causado por una chispa de energía estática por la pintura de tipo alúmina que fue aplicada en el cuerpo de la nave, ocasionando que el hidrógeno dentro de la nave se incendiara (Okano, 2016).

La combustión incontrolada de H_2 liberado accidentalmente por fugas libera una gran cantidad de energía en forma de un incendio o una explosión. “Las condiciones de combustión dependen de la concentración de H_2 ya que con una concentración del 8 %, la velocidad de combustión es lenta y no se produce demasiado sonido, por el contrario, cuando la concentración excede el 20 % se muestra una combustión intensa. La combustión se propaga hacia arriba y horizontalmente a concentraciones superiores del 6%; y en todas direcciones en concentraciones superiores al 9 %” (Yagy, 1977).

Existen diferentes formas de la combustión del H₂, las cuales son a través de un incendio en la fuente, una deflagración o por una detonación; dependiendo de la concentración del gas, del medio oxidante y de la fuente de ignición. Los incendios son ocasionados cuando una fuente de H₂ está rodeado por un oxidante, como lo es el aire, puede inflamarse produciendo una llama dependiendo de la velocidad de liberación del H₂. La flama de H₂ irradia menos calor que los combustibles convencionales y su llama es invisible a la luz del día y a la luz artificial, pero emite radiación ultravioleta que puede ocasionar quemaduras. Si el incendio ocurre en un área confinada se producirá un aumento de presión casi 8 veces la presión inicial (International Organization for Standardization, 2004).

Cuando la concentración de H₂ se combina con el oxígeno del aire antes del incendio, la llama que se forme se moverá rápidamente a través de la región combustible. La llama puede quemarse por dos procesos: por deflagración o por detonación. Una deflagración es una flama que se propaga a través de medio combustible a una velocidad menor que la velocidad del sonido del medio sin quemarse. Si la llama alcanza una velocidad alta y encuentra turbulencia en el medio, la deflagración puede transformarse en una detonación, este proceso se conoce como transición de deflagración a detonación (DDT por sus siglas en inglés). Por otra parte, la detonación requiere mezclas ricas de hidrógeno-oxidante, una fuente de ignición con más energía, además de que el gas debe de estar en confinamiento. En la detonación la onda de choque es parte fundamental del proceso de combustión. La detonación se propaga a una velocidad mayor a la velocidad del sonido, típicamente de 1,500 m s⁻¹ a 2,000 m s⁻¹ y produce un aumento en la presión con un intervalo de 1.5 MPa a 2 MPa (International Standard, 2011).



Sistemas de seguridad para el hidrógeno

Siempre se presentan situaciones de alto riesgo por consecuencia de la generación, procesamiento y almacenamiento de hidrógeno debido a su alto nivel de peligrosidad, por lo que, un suceso incontrolado de este gas ocasionaría graves daños a los usuarios, bienes y medio ambiente. Como consecuencia se exigen estrictas medidas de seguridad para identificar y evaluar riesgos, como es el caso de la implementación de un lazo de control de seguridad.

Un lazo de control es el conjunto de elementos que tienen como objetivo mantener una variable de proceso fija en un valor de operación deseado. Dicho lazo consiste en medir la variable de proceso (variable a monitorear) a través del elemento primario del lazo, enviando una señal de entrada a un transmisor, el cual emite una señal de salida hacia un controlador comparando el valor de la señal de entrada con el valor predeterminado, el controlador envía otra señal al elemento final para mantener constante la variable de proceso (Smith, 1991).

Generalmente, los lazos de control se utilizan como mecanismos de seguridad para garantizar una operación óptima y adecuada de equipos en diferentes tipos de procesos industriales, destacando el sistema de detección de gases debido a que los gases no se detectan sensorialmente, por lo tanto, se debe utilizar instrumentos capaces de detectar las variaciones de alguna característica del gas. Este sistema recibe el nombre de Sistemas de Instrumentación de Seguridad (SIS).

Un Sistema Instrumentado de Seguridad es un sistema de control el cual detecta concentraciones de gases peligrosos, para activar alarmas y medidas correctivas antes de que se pueda producir una situación peligrosa para empleados, instalaciones y medio ambiente, y por lo tanto lleva al proceso a un estado seguro cuando se han violado las condiciones predeterminadas (PEMEX, 2010). En la Figura 1 se muestran los elementos que conforman un SIS por medio de un diagrama de bloques.

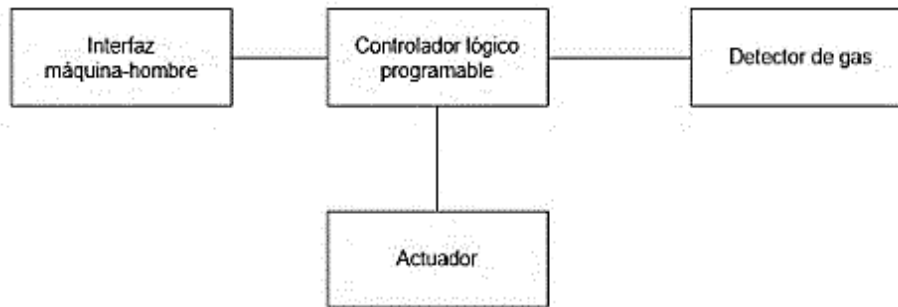


Figura 7. Elementos de un SIS

A continuación, se describe cada elemento que conforman al SIS (PEMEX, 2010):

- Sensor: dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, como un desplazamiento, una presión o un voltaje, que pueda utilizarse para comparar la salida con una señal de referencia (Ogata, 2010).
- Controlador lógico programable: es un sistema computarizado que continuamente monitorea el estado de los dispositivos de entrada y toma decisiones basadas sobre un programa personalizado para controlar el estado de los dispositivos de salida (Rohner, 1996).
- Actuador: elemento final de control que actúa sobre el proceso o sobre la señal de salida.

Estos elementos se aplican a los procesos, en donde el descontrol de éstos no puede ser corregido por un operador debido a su velocidad de desarrollo y a su complejidad, por esta razón se desarrollan lazos de control automatizados para que en caso de peligro se activen acciones correctivas para llevar al proceso a un estado seguro (Smith, 1991)

Los sistemas de control de seguridad se originaron en 1970 por la empresa alemana Pilz GmbH & Co. KG quienes inventaron el relevador para control de dos manos, el cual era un dispositivo que para funcionar el operador debía de presionar simultáneamente con ambas manos los botones de cada extremo, y así se aseguraba de que el operado estaba fuera de la zona peligrosa del proceso (Sánchez, 2018). En la Figura 5 se muestra el relevador a dos manos.



Figura 8.. Relevador a dos manos.

Los primeros en evaluar la factibilidad de los SIS fue la NASA, quienes utilizaron por primera vez el H_2 como fuente de combustible, pero las fugas de H_2 eran comunes en los transbordadores espaciales, por ello se impedía el lanzamiento para identificar la fuga y estos retrasos en los lanzamientos significaban altos costos para el programa, por lo tanto, se desarrollaron detectores automatizados de detección de fugas de H_2 capaces de operar antes del lanzamiento y en el transcurso del vuelo, además se incorporaron sensores al software para monitorear rápidamente múltiples puntos de fugas dando la locación y la magnitud.

El sistema completo consiste en 3 elementos: un sensor de H_2 , una unidad de procesamiento de la señal y un procesador de diagnóstico. Los sensores de H_2 fueron localizados en los sitios potenciales de fugas. La unidad de procesamiento provee la energía a los sensores y realiza la conversión análoga a digital. El procesador de diagnóstico analiza las salidas del sensor para determinar la posición y la magnitud de las fugas. Los datos de las fugas del sensor son interpretados usando un software y mostrados en línea a través de una interfaz gráfica (Hunter, 1995).

En el 2015, en un laboratorio de cromatografía la válvula de seguridad de alivio de un cilindro de gas de H_2 con 50 litros falló debido a una sobrepresión y liberó cerca de 0.34 kg de hidrógeno en el laboratorio. La fuga fue detectada por un sensor de H_2 el cual activó una alarma, posteriormente la válvula de dónde provenía la fuga de H_2 fue cerrada manualmente por el personal de seguridad. La nube de gas no se encendió, pero si la nube de gas se hubiera inflamado la explosión probablemente hubiera causado daños estructurales.

El controlador manipulaba 3 detectores y tenía 2 alarmas que se activaban cuando el H_2 alcanzaba el 10 % de LEL, cada alarma se identificaba por un sonido y señales de luz. El contar con un sistema de alarma de H_2 pudo haber salvado al laboratorio de una explosión

grave. No había personal dentro del laboratorio durante la fuga, así que sin el sistema de alarma todo el H₂ en los cilindros hubiera sido liberado. Esto podría haber creado una nube de gas con una altura aproximadamente de 1.2 m (Henriksen, 2017).

El elemento más importante en un sistema de detección de es el sensor y existen una gran variedad de sensores de hidrógeno, de los cuales los sensores de tipo de combustión catalítica o de conductividad térmica son ampliamente utilizados, aunque ninguno de los dos detecta el H₂ selectivamente.

El principio de medición del sensor de tipo de combustión catalítica es que cuanto mayor es la concentración de hidrógeno en el aire, mayor es la temperatura de combustión (oxidación del catalizador) del elemento sensor. Este sensor no puede utilizarse en un ambiente sin oxígeno. Además, cuando existe otro gas combustible, no se obtiene un valor exacto y como resultado el sensor consume oxígeno e hidrógeno durante la medición; por lo tanto, la concentración aparentemente disminuye en un pequeño espacio cerrado con el tiempo.

El principio del sensor del tipo de conductividad térmica es que la radiación térmica procedente del elemento sensor depende de la conductividad térmica de los gases circundantes. Por lo tanto, el oxígeno no es necesario para la medición. Sin embargo, cuando se mezclan gases distintos del aire, no se obtiene un valor exacto. Por lo anterior, es necesario entender las características de los sensores para usarlos correctamente (Standard, 2007).

A continuación, se mencionan algunos factores que se deben de considerar para seleccionar un sensor:

- Exactitud
- Confiabilidad
- Mantenimiento
- Calibración
- Límites de detección
- Tiempo de respuesta
- Compatibilidad con los elementos del lazo de control

Algunos lugares sugeridos para colocar los detectores de hidrógeno son los siguientes:

- Lugares en donde se puedan producir fugas de hidrógeno

- En conexiones que se separen rutinariamente
- Áreas en donde el hidrógeno pueda acumularse

Por otra parte, el no contar con un sistema de detección de gases pone en riesgo a los trabajadores y a la planta, debido a que no existen sistemas enfocados a detectar concentraciones de gases peligrosos para activar alarmas y contramedidas antes de que se pueda producir una situación altamente peligrosa (Dräger Safety Hispania, 2009), un ejemplo es la planta de pesticidas La Porte, la cual tuvo una fuga química tóxica de 24.000 libras de metilmercaptano a través de dos válvulas que mató a cuatro trabajadores. El edificio en el que murieron los trabajadores no estaba equipado con un sistema de detección de gases tóxicos adecuado para alertar a los trabajadores de la presencia de los productos químicos. Finalmente, el metilmercaptano encontró una chispa y explotó (SAFETY, 2015).

Por los peligros que conlleva trabajar con H_2 se han hecho estudios de una apropiada ventilación para un electrolizador para prevenir explosiones por fugas de H_2 . El criterio adecuado de ventilación fue establecido calculando la cantidad de la fuga de H_2 de acuerdo al tamaño del agujero de la fuga. Cuando el agujero media 1 mm en el tanque de H_2 , la distribución de la densidad bajaba dramáticamente a una distancia de 65 cm de la fuente de fuga. Cuando el agujero tenía 5 mm, la distribución de densidad bajaba a una distancia de 3.9 m de la fuente. La velocidad de la fuga fue más baja en el agujero de 1 mm porque el H_2 se dispersó en el aire tan pronto salía por la fuga, resultando en que la densidad era dispersada a una distancia más corta. Para el agujero de 5 mm, la distancia fue de 3.9 m debido a la energía cinética y a la velocidad de fuga del H_2 , estos experimentos fueron llevados en espacios abiertos; la situación en espacios cerrados es significativamente más peligrosos porque la fuga de H_2 puede ser colectada en la cima del cuarto. El nivel de ventilación se clasifica en alta, media y baja. La ventilación alta inmediatamente puede disminuir la densidad de la fuga y así disminuir el porcentaje del límite bajo de explosividad, si no existe una adecuada ventilación el área puede ser propensa a tener un alto grado de riesgo de la explosión del gas (Lee & Lee, 2016). La ventilación o los accesorios de alivio de presión son una de las medidas más eficientes para proteger a los equipos de las deflagraciones, en la Figura 9 se observa el incremento de la presión provocada por una deflagración dentro de un recipiente cuando no existe venteo dentro del sistema, en

comparación con un sistema con venteo en donde la presión de deflagración no alcanza a la presión de diseño (Alonso, 1997).

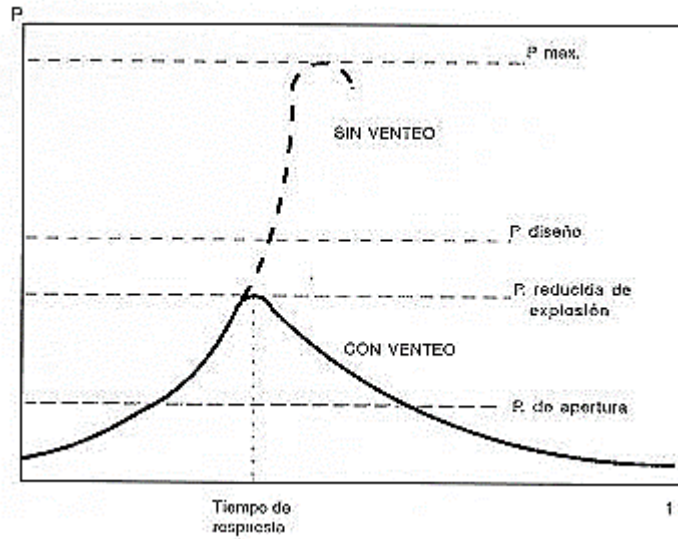


Figura 9. Variación de la presión con venteo y sin venteo dentro de un sistema cerrado.

Capítulo 2

Metodología

Metodología

Para abordar el objetivo general de este trabajo, el cual es definir un lazo de control para el monitoreo y control de las emisiones de hidrógeno, con la finalidad de prevenir los riesgos que se presenten durante la operación normal de éste equipo que previamente se definió como un módulo de proceso de electrólisis desarrollado por Pacheco *et al.* El presente trabajo parte de la caracterización, selección y configuración de los diferentes componentes (ingeniería conceptual) hasta la programación, montaje y puesta en marcha del lazo de control (equipo de monitoreo), que se llevará a cabo como se muestra en la Figura 10.

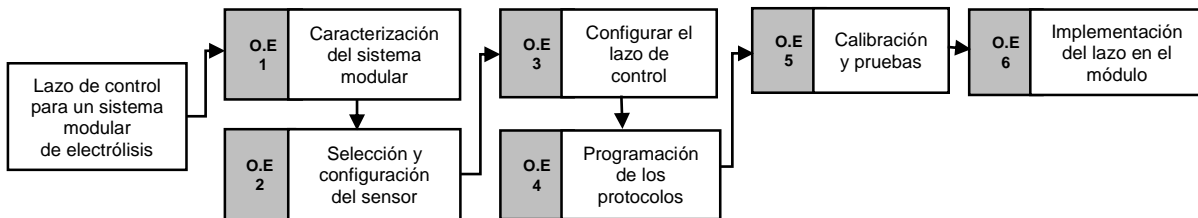


Figura 10. Metodología para el desarrollo del presente trabajo.

Metodología del objetivo específico 1

Para la caracterización del sistema modular de electrólisis se realizaron mediciones directas (longitudes y espesores) e indirectas (volúmenes) de las secciones del equipo, las cuales fueron obtenidas por medio de instrumentos de medición como vernier, regla y flexómetro. A partir de estos datos se desarrollaron los planos y diseños abiertos utilizando un software CAD, en donde posteriormente se realizó el diseño general del equipo y los diseños individuales de cada uno de los componentes que conforman el módulo, lo que permitió tener diferentes perspectivas del equipo.

Una vez terminados los diseños se llevó a cabo un análisis de mecánica de fluidos a partir de la consideración de temperatura y densidad de los gases aire, oxígeno e hidrógeno para establecer el arreglo de los accesorios en el sistema modular de una forma virtual. En la Figura 11 se observa el desarrollo empleado para la caracterización del módulo.



Figura 11. Metodología del objetivo específico 1.

Metodología del objetivo específico 2

Para llevar a cabo la selección del sensor apropiado para los requerimientos estructurales y para la capacidad de producción del sistema modular, en la Figura 12 se detalla el procedimiento que parte del estado del arte en donde se recopiló información de libros, artículos y material complementario para conocer los diferentes equipos, dispositivos y sensores aplicados para el monitoreo de gas hidrógeno a concentraciones deseadas. Del mismo modo se evaluaron diferentes parámetros para la selección del sensor, como sus características estructurales (tamaño, forma y material de fabricación) y funcionales (rango de detección, alcance, tiempo de respuesta, entre otros), para posteriormente sintetizar una tabla en la cual se observan y se comparan parámetros como voltaje de alimentación, rango de detección, tiempo de respuesta y costos de los sensores propuestos en la literatura.

Por consiguiente, para seleccionar el controlador lógico programable se consideró la compatibilidad del intercambio de información como el tipo de señal de conexión (análoga o digital) y la alimentación de voltaje con respecto a los sensores propuestos, así como su accesibilidad en el mercado.

Para la realización del hardware del lazo de control, se instalaron los elementos actuadores constituidos por un sistema de ventilación en el tiro del módulo y un relevador que permite el paro total de la alimentación de voltaje hacia los reactores; estos elementos en conjunto con los sensores se conectaron al controlador por medio de un cableado. Asimismo, se realizaron los diseños electrónicos que permiten visualizar las conexiones entre los componentes antes mencionados.

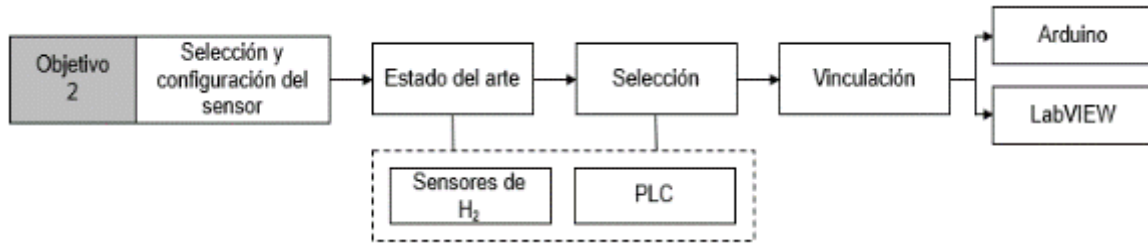


Figura 12. Desarrollo del objetivo específico 2.

Metodología del objetivo específico 3

Para representar matemáticamente el lazo de control se obtuvo la función de transferencia. En la Figura 13 se representa el desarrollo del objetivo.

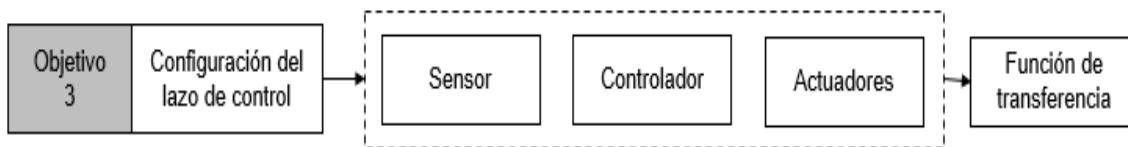


Figura 13. Desarrollo del objetivo específico 3.

Metodología del objetivo específico 4

El objetivo 4 se realiza de manera simultánea al objetivo 3. En primer lugar, se realizó la vinculación entre el sensor y el controlador efectuando los protocolos de conexión en los softwares Arduino y LabVIEW, debido a que dichos programas permiten la vinculación de todos los elementos del lazo de control seleccionados, así como la interacción máquina-hombre por medio de una interfaz gráfica.

En el software de LabVIEW se establecieron las conexiones entre el controlador, los sensores y los relevadores que manipulan al sistema de ventilación y a la batería por medio de algoritmos en lenguaje G, en donde, se programaron los sensores con entradas análogas para posteriormente convertir los valores análogos en unidades de voltaje y finalmente en unidades de ppm. Para los relevadores se utilizaron entradas digitales debido a que sólo recibe dos instrucciones: “encendido” y “apagado”.

Para establecer los parámetros de seguridad a implementarse en el algoritmo de programación, se definieron de acuerdo a estándares nacionales e internacionales reportados en la literatura en tema de generación, manejo y almacenamiento de hidrógeno gaseoso. Cuando en el módulo de reacción se detecte concentraciones de hidrógeno por arriba o igual al límite propuesto, un relevador acciona el sistema de ventilación y el segundo cierra el circuito de la batería que alimenta a los reactores.

Con el fin de permitir la interacción del usuario con el programa, se desarrolló un panel de control virtual para operar y monitorear las lecturas de los sensores en tiempo real, así como la generación de una base de datos para el resguardo de las lecturas de los sensores.

En la Figura 14 se presenta el desarrollo lógico para la generación del software del lazo de control.

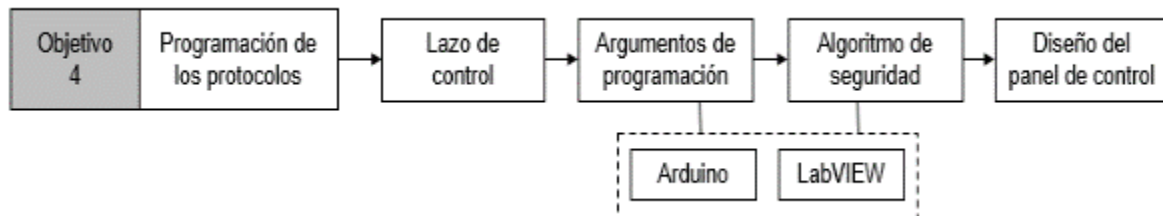


Figura 14. Desarrollo del objetivo específico 4.

Metodología del objetivo específico 5

Una vez establecidos los límites permisibles de concentración de hidrógeno determinados para el equipo, es necesario llevar a cabo una calibración que garantice que los datos interpretados por el sistema sean fidedignos. Para realizar la calibración de los sensores se manejó la técnica propuesta por el fabricante, en la cual, por el método de linealización se obtuvo la ecuación de la curva de sensibilidad del gas hidrógeno de la hoja de datos del sensor, dicha ecuación se programó en el algoritmo de LabVIEW.

Enseguida, se realizaron pruebas en el módulo en donde se verificó que el lazo de control funcionaba correctamente y se realizaron las modificaciones necesarias en la programación del controlador para un funcionamiento adecuado.

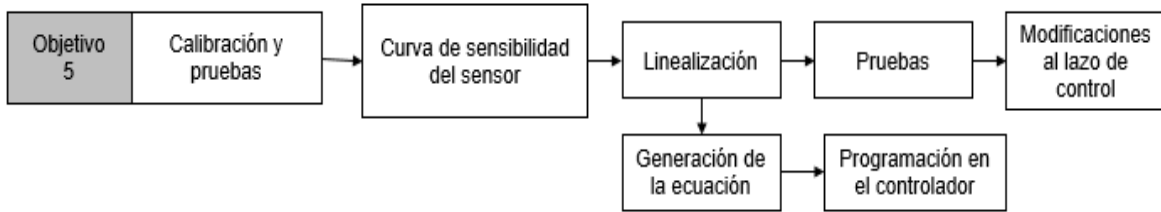


Figura 15. Desarrollo del objetivo específico 5.

Metodología del objetivo específico 6

Finalmente, se diseñaron en un software CAD y se construyeron por medio de impresión en 3D con plástico ABS las diferentes cubiertas y elementos mecánicos que protegen y dan soporte a los diferentes elementos eléctricos del lazo de control para facilitar su armado y montaje en el sistema modular.

Cada elemento del lazo se acopló por soldadura blanda para sellar las conexiones eléctricas. Una vez montado el sistema de detección se prosiguió a realizar pruebas en el módulo de reacción para verificar el funcionamiento correcto del sistema. En la Figura 16 se observa el desarrollo del objetivo 6.

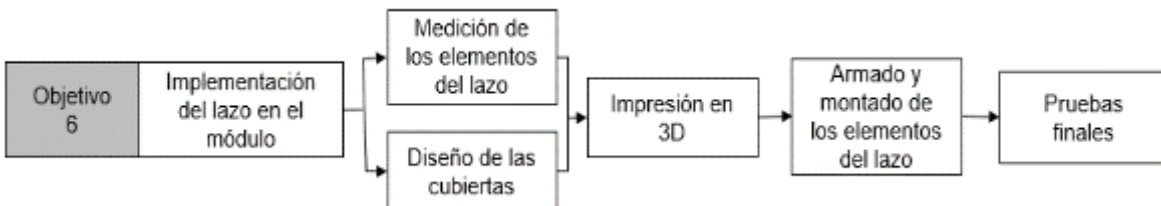


Figura 16. Desarrollo del objetivo específico 6.

Capítulo 3

Resultados

Resultados

El resultado para el objetivo general es una propuesta de lazo de control con el cual se pudo desarrollar un equipo para el monitoreo y control de emisiones de hidrógeno para prevenir los riesgos que se presenten durante la operación normal del equipo modular. El lazo de control evalúa la concentración de hidrógeno adentro del módulo y determina si el parámetro se encuentra en el rango del setpoint establecido, si no es así, se activa un sistema de respuesta conformado por un sistema de ventilación y el paro de la planta.

- Objetivo específico 1: Caracterización del sistema modular

El sistema modular es un equipo conformado por reactores de celdas secas desarrollado por Pacheco *et al.* en 2016, en la Figura 17 se presenta un diseño general del equipo.

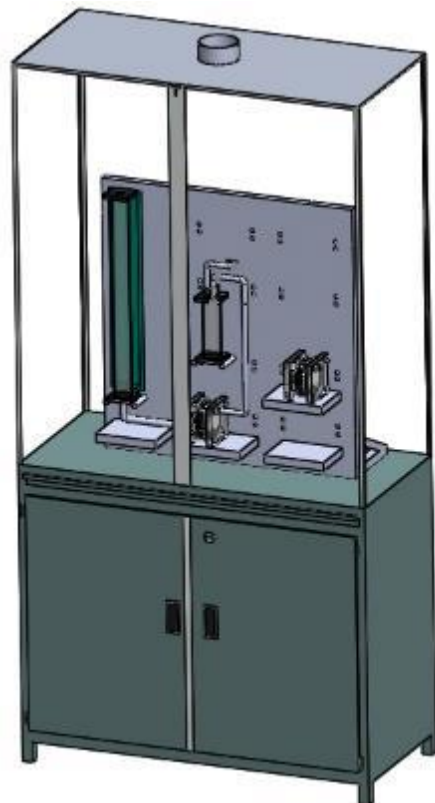


Figura 17. Sistema modular de reactores.

El sistema modular está constituido por dos principales elementos: el gabinete y el soporte de los reactores. A continuación, se presentan las características de ambos elementos.

El gabinete

El gabinete incluye dos secciones: almacenamiento y de reacción. La sección de almacenamiento es una estructura de acero inoxidable con dimensiones de 82 cm de alto, 105 cm de largo y 48 cm de ancho; en el interior se encuentra una división horizontal de 48 x 105 cm en donde se guardan los accesorios, componentes y herramienta del sistema modular.

La sección de reacción es una estructura compuesta de soportes de acero inoxidable y paredes de acrílico. La sección tiene unas dimensiones de 119 cm de alto, 105 cm de largo y 48 cm de ancho. El equipo presenta dos accesos ubicados en la parte frontal y trasera del módulo compuestas por puertas abatibles, además de que cada una cuenta con un pestillo. En la parte superior del módulo se encuentra un tiro con 11 cm de diámetro con la capacidad de instalar un sistema de ventilación. Conjuntamente se ubican dos lámparas de leds de 127 V y 11 W en ambos extremos de las paredes. En la Figura 18 se muestran las medidas en centímetros correspondientes al gabinete.

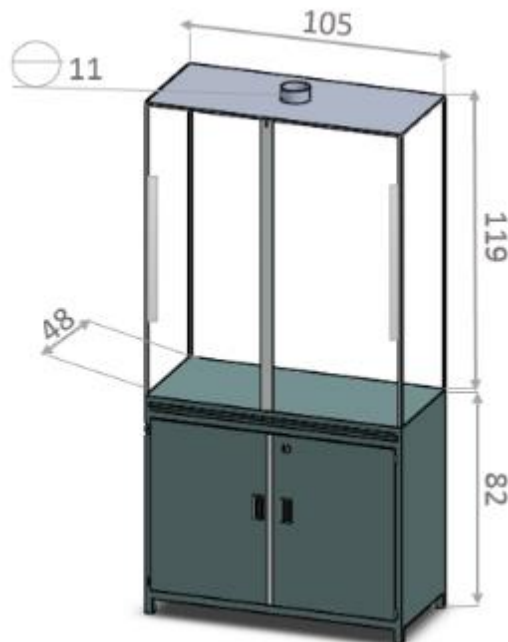


Figura 18. Dimensiones del sistema modular.

El soporte

En el interior del gabinete se encuentra el soporte de acero inoxidable de 80 cm de alto y 76 cm de largo con un espesor de 2.5 cm, el cual está conformado por soportes desmontables para la colocación de los reactores con medidas de 13.5 cm de ancho y 8 cm de largo con un espesor de 2.5 cm. Además, se encuentra un contenedor de gases de acrílico en la parte central y un tanque de almacenamiento de agua con electrolito en el extremo derecho para el llenado de los reactores. En la Figura 19 se muestran el soporte con el reactor, el contenedor de gases y la columna de agua.

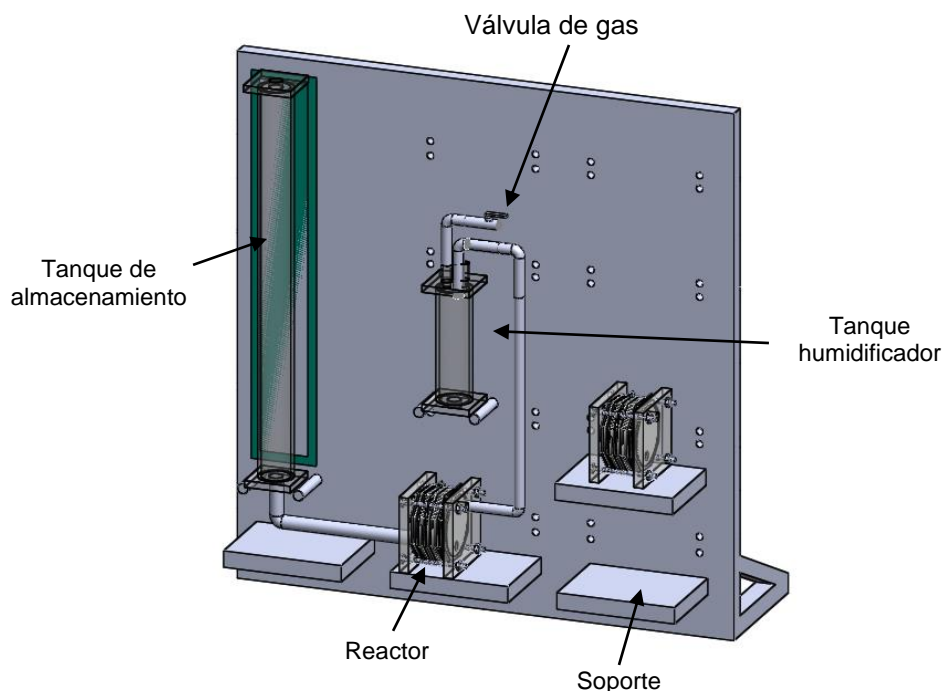


Figura 19. Soporte para los reactores de celda seca.

Reactores de celdas secas

Los reactores de celdas secas están conformados por placas octagonales de acero inoxidable, y éstas, a su vez se dividen en placas neutras, positivas y negativas. El número de placas es variable dependiendo de la configuración que se le dé al reactor. El grosor de las placas es de 0.1 cm y cada placa cuenta con dos orificios de 1.3 cm de diámetro para el paso del agua y para la salida del gas ubicados en la parte superior e inferior de las

mismas. Las placas negativas y positivas cuentan con una pestaña y con un orificio de 0.6 cm para ensamblarlas al electrodo positivo o negativo.

Entre cada placa se encuentra un sello de plástico para impedir las fugas de agua entre las placas, estos sellos tienen un diámetro de 9 cm y un grosor de 0.1 cm. El número de sellos dependerá del número de placas en el reactor. En la Figura 20 se muestra el reactor de celdas secas armado con una configuración de placas negativa- neutra- positiva.

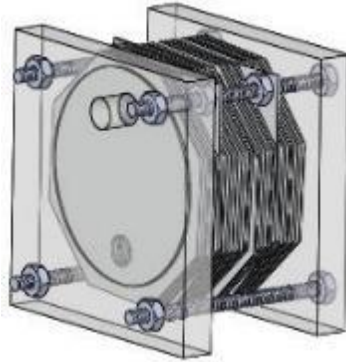


Figura 20. Reactor de celda seca.

En cada reactor se coloca a los extremos una placa de acrílico de 11.40 X 11.40 cm de lado y con un espesor de 1.4 cm. Cada placa cuenta con un orificio en la parte superior de 1.3 cm de diámetro para la entrada de agua y para la salida de gases. Los electrodos son cuatro tornillos de 10 cm de largo con un diámetro de 0.6 cm, los cuales atraviesan las pestañas de las placas negativas y positivas, así como en las cuatro esquinas de las placas de acrílico. Para compactar la estructura se utilizan tuercas hexagonales con un diámetro de 0.6 cm. En la Figura 5 se muestran las diferencias entre las placas con carga y las placas neutras, así como cada elemento descrito anteriormente que conforman al reactor de celdas secas.

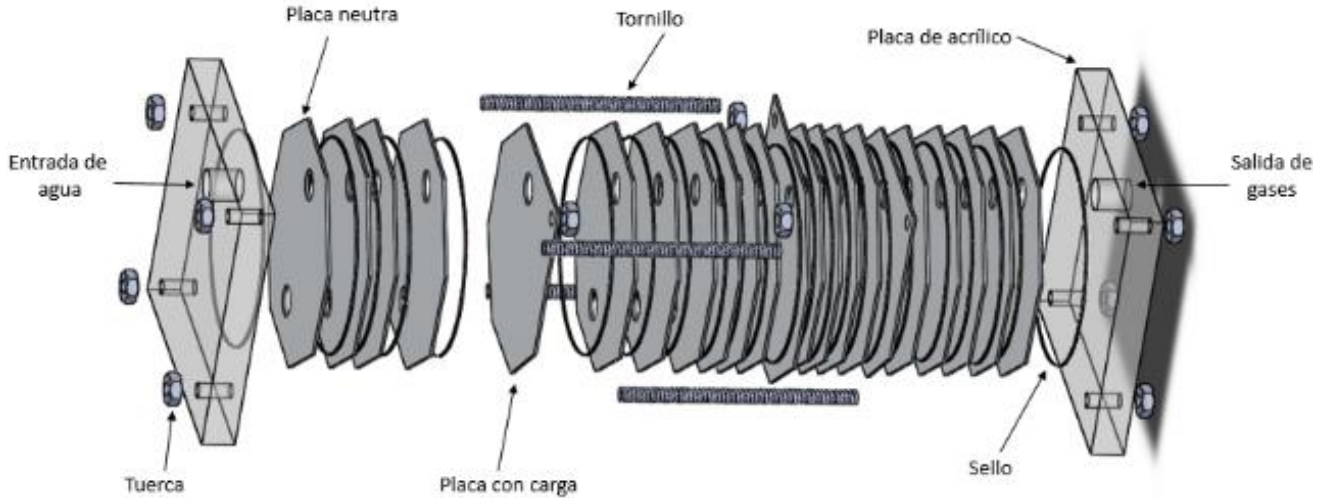


Figura 21. Partes del reactor de celda seca.

- Objetivo específico 2: Selección y configuración del sensor de detección de hidrógeno y del hardware del lazo de control.

De la información recabada, se seleccionaron los sensores mostrados en la Tabla 2, los cuales son los sensores frecuentemente utilizados para la detección de hidrógeno. Además, se muestran los voltajes que requiere cada sensor para funcionar, el rango de detección de concentración de hidrógeno, el tiempo de respuesta y los costos:

Tabla 2. Sensores de hidrógeno.

Nombre	Voltaje de alimentación	Rango	Tiempo de respuesta	Costo (M.N.)
MQ-8	5 V	100 a 10,000 ppm	800 ms	\$ 85.00
MQ-2	5 V	300 a 10,000 ppm	800 ms	\$ 85.00
Hy-Alerta 500	90 V a 260 V	15 ppm a 100 % en volumen de H ₂	100 ms	\$ 22,272.00
US 7200P Hydrogen Detector	Batería de 3.6 V	0 a 20,000 ppm	100 ms	\$ 37,120.00

Para la selección del sensor se evaluaron parámetros como: sensibilidad, rango de detección, resistencia, precisión, métodos de calibración, y accesibilidad. Con esto, se

seleccionó el sensor MQ-8 ya que posee un voltaje bajo de alimentación, un alto rango de detección de H_2 y sobre todo porque está hecho para utilizarse en prototipos debido a que el manejo del gas H_2 es mínimo, por lo que es un sensor accesible.

Descripción del sensor MQ-8

El sensor MQ-8 es un sensor electroquímico el cual varía su resistencia cuando está en contacto con las sustancias como el hidrógeno, el alcohol, el metano, el gas LP y el monóxido de carbono. En la Figura 22 se muestra el diseño del sensor MQ-8.

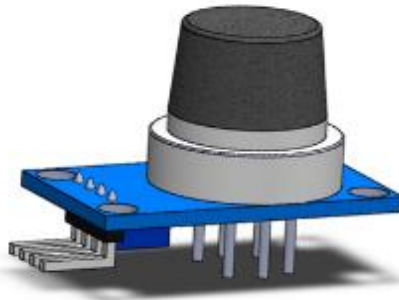


Figura 22. Sensor MQ-8.

El sensor se alimenta con una conexión de 5 V y detecta los gases en concentraciones de 10 a 10,000 ppm, para ajustar el voltaje se realiza por medio del potenciómetro que esta adjunto de la placa del sensor.

En el interior del sensor se encuentra un calentador de Al_2O_3 con una capa sensible de SnO_2 para elevar la temperatura y así adquirir más sensibilidad hacia los gases expuestos, mientras el sensor no tenga la temperatura adecuada de funcionamiento, la lectura del sensor no será confiable. En la Figura 23 se representa el interior del sensor en el cual se muestra el microtubo de cerámica sujeto a los 6 pines del sensor, en los que 4 de ellos se utilizan para procesar la señal y 2 para proporcionar la corriente eléctrica para calentamiento.



Figura 23. Interior del sensor M-8.

Para controlar el sensor se vinculó con una placa Arduino Mega 2560 debido a que el controlador permite crear una conexión entre estos elementos y suministra el voltaje necesario para el funcionamiento del sensor. El controlador Arduino Mega es una tarjeta con un microcontrolador que posee 54 pines digitales (entradas y salidas) y 16 pines analógicos. La tarjeta puede ser alimentada por el puerto USB o con una fuente externa de poder; en la Figura 24 se muestra la placa de Arduino Mega y en la Tabla 3 se mencionan algunas características de la placa.

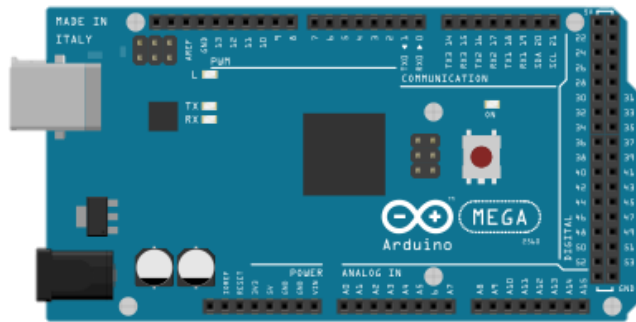


Figura 24. Placa Arduino Mega.

Tabla 3. Características técnicas de la placa Arduino Mega 2560.

Elemento	Información
Microcontrolador	Atmega2560
Voltaje de operación	5 V
Pines para entrada/salida digital	54 (15 salidas PWM)
Pines de entrada analógica	16
Memoria Flash	256 KB (gestor de arranque 8 KB)

Peso	37 g
Medidas	101.52 x 53.3 mm

El hardware lazo de control está conformado por 4 sensores MQ-8 para monitorear las concentraciones de hidrógeno en el interior del módulo de reacción debido a que cada uno tiene un alcance de 30 cm, por lo que, se necesitarían mínimo 4 sensores para monitorear el área de proceso del módulo. El sensor cuenta con 4 pines, de las cuales 2 son salidas de datos tanto analógica (A0) como digital (D0); y se alimenta el módulo conectando la corriente de 5V en el pin Vcc y en la conexión a tierra (GND). En la Figura 25 se muestra el arreglo de los pines del sensor MQ-8 y del potenciómetro.

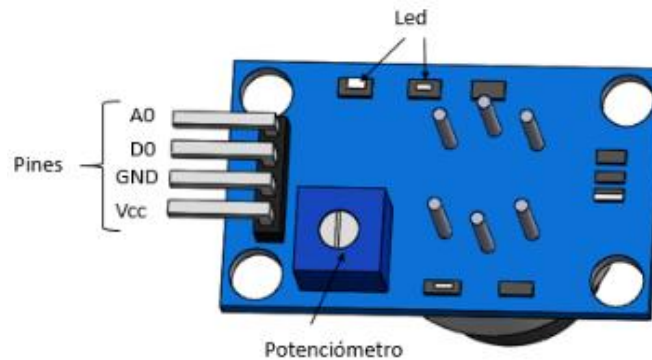


Figura 25. Parte inferior del sensor MQ-8.

Los actuadores están conformados por el ventilador y la batería que suministra la corriente a los reactores. El ventilador tiene un diámetro de 11 cm y funciona con una alimentación de 12 V. en la Figura se muestra una representación del ventilador utilizado.

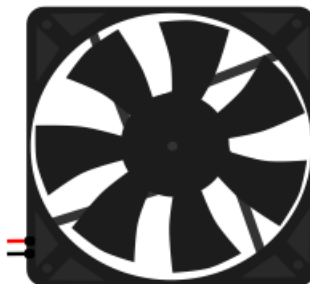


Figura 26. Ventilador

Para el funcionamiento del ventilador se colocó un relevador, el cual es un interruptor que puede ser controlado eléctricamente y puede establecer una conexión entre el ventilador y el controlador, además permite suministrar el voltaje necesario a través de un cargador o una batería para el funcionamiento del ventilador de 12 V, ya que el Arduino sólo suministra 5 V y la alimentación para el funcionamiento del relevador es de 5 V. En la Figura 27 se muestra la conexión entre el ventilador, el relevador, la batería y el Arduino.

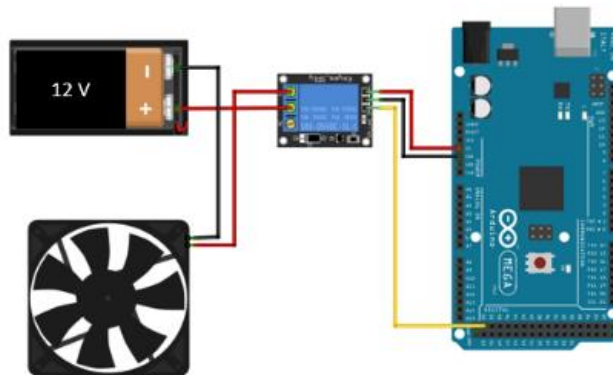


Figura 27. Conexión entre batería, relevador, ventilador y Arduino.

La batería que suministra la alimentación de corriente a los reactores de igual forma se conectó a un relevador para establecer una conexión con el controlador. A continuación, en la Figura 28 se muestra la conexión entre los sensores de gas MQ-8, el ventilador, la batería y la placa Arduino Mega.

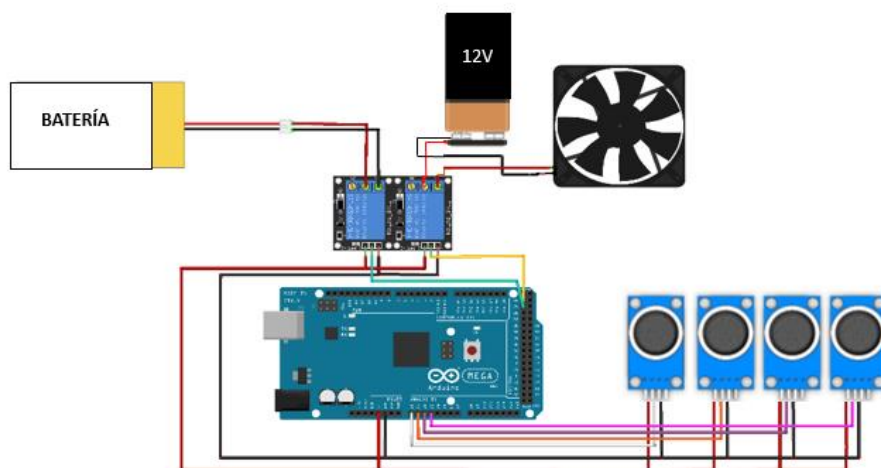


Figura 28. Conexión de los elementos del lazo de control.

- Objetivo específico 3 y 4: Configurar un lazo de control para la evaluación de la concentración de hidrógeno en aire y programación de los protocolos y del controlador lógico programable del sensor de evaluación.

El desarrollo de la programación se realiza a través del lenguaje C+ en la interfaz Arduino IDE y por medio del lenguaje G con la interfaz de LabVIEW. Para crear la vinculación a través de los programas de Arduino y LabVIEW, a continuación, se muestran 6 pasos resumidos:

1. Instalar el programa con licencia o la versión de prueba de LabVIEW y el programa gratuito de Arduino que se encuentra en la página oficial.
2. Instalar el VI Package Manager, este programa se instala junto a LabVIEW.
3. Descargar el paquete NI LabVIEW Interface for Arduino Toolkit de la página de National Instruments e instalarlo.
4. Una vez abierto el paquete de NI-VISA, buscamos el paquete LabVIEW Interface for Arduino y procedemos a instalarlo.
5. Instalar los drivers correspondientes para la correcta comunicación entre los programas.
6. Abrir los IDE de Arduino que se encuentra en la carpeta de instalación del programa y abrimos el sketch LIFA_Base.ino, finalmente se carga el sketch a la tarjeta Arduino.

Para la programación de los protocolos del lazo de control se utilizó la interfaz de LabVIEW debido a que permite crear una interfaz en donde se visualiza el código de manera gráfica. El programa se divide en 2 partes: el panel frontal en donde el usuario interactúa con el programa a través de un panel de control virtual; y el diagrama de bloques la cual es la plataforma en el que se desarrolla el código del programa. (Mihura, 2001).

En la ventana de diagrama de bloques para representar el sensor se utilizó un bloque de entrada analógica ya que muestra una señal de voltaje que varía con respecto de la información que van obteniendo de las lecturas y posteriormente, por medio de ecuaciones se realizaron las conversiones necesarias realizadas en la calibración del sensor para mostrar la concentración de hidrógeno. En la Figura 29 se muestra el código para el sensor.

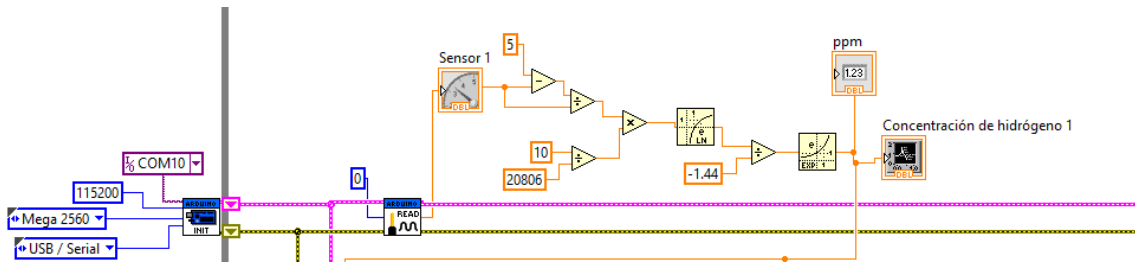


Figura 29. Código del sensor MQ-8.

Para el caso de los relevadores se utilizó bloques de entrada digitales los cuales sólo tienen dos señales de salida “apagado” y “encendido”. El relevador del ventilador se enciende y el relevador de la batería se apaga cuando los sensores detectan una concentración fuera del límite establecido. Además, se acopló un “beep” el cual es una alarma sonora que se activa cuando la batería se apaga. En la Figura 30 se muestra el código para los relevadores del ventilador y la batería.

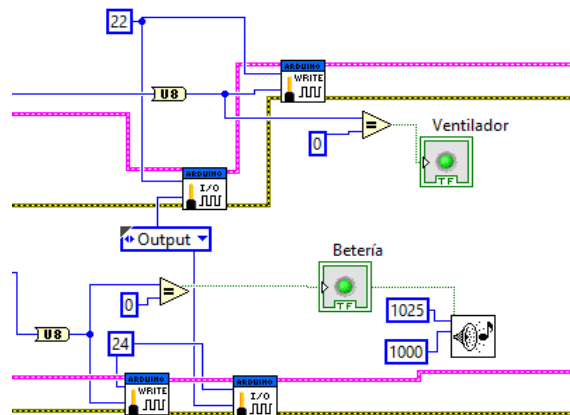


Figura 30. Código de los relevadores.

Los límites de seguridad se propusieron de acuerdo a la norma ISO/TR 15916:2004 que establece que los sistemas de seguridad se deben de accionar con la lectura de 1% de hidrógeno en el aire, lo cual equivale al 25 % del límite inferior de explosividad. Debido a que el sensor empleado tiene un rango hasta 1,000 ppm no es posible emplear como límite 10,000 ppm, por lo que para establecer el límite se tomó el 25 % del límite superior de detección del sensor, es decir, el límite se estableció en 250 ppm.

Para el almacenamiento de la información de los datos recabados en las pruebas se realizó el código que se muestra en la Figura 31, el cual nos permite guardar los datos en la memoria de la computadora con fecha, hora y las lecturas del sensor.

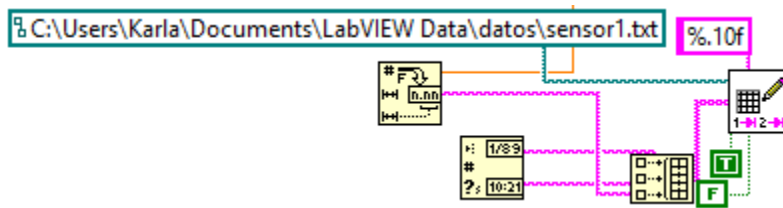


Figura 31. Código para almacenar información de los sensores.

En la ventana de panel frontal se desarrolló un panel de control que se observa en la Figura 32 en el cual se muestran los potenciómetros de calibración de cada sensor, la representación gráfica y numérica de las lecturas mostradas en ppm de los sensores; y se representan leds los cuales muestran cuando el ventilador y la batería están en funcionamiento. Además, se tiene un botón de “stop” para parar por completo el programa y reiniciarlo.

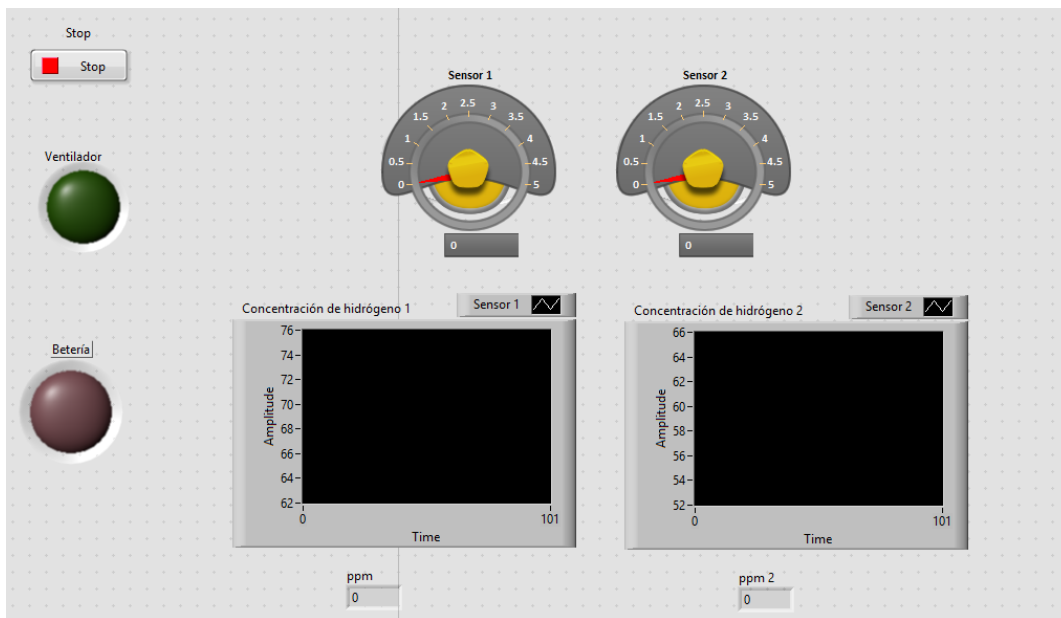


Figura 32. Panel de control en LabVIEW.

- Objetivo específico 5: Calibración y pruebas de funcionamiento.

Para la calibración del sensor se realizó la metodología sugerida por el fabricante, en la cual establece que los datos de salida del sensor son datos analógicos, es decir, valores

de 0 a 1023 y para obtener su equivalencia en voltaje se debe de emplear la siguiente conversión:

$$\text{Voltaje de salida del sensor (Vs)} = \text{Señal leída del sensor} \cdot \frac{5}{1023}$$

El voltaje será proporcional a la señal analógica enviada por el sensor y para cuantificar cuantas partes por millón (ppm) ha detectado el sensor se calcula la función del gráfico de las características de sensibilidad del sensor para el gas hidrógeno por medio del método de linealización. A continuación, en la Figura 33 se muestran las curvas de gases para el sensor MQ-8.

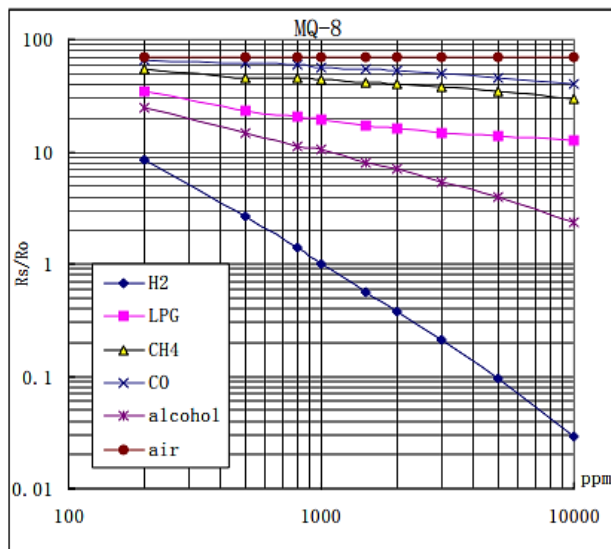


Figura 33. Curvas de gases para el sensor MQ-8.

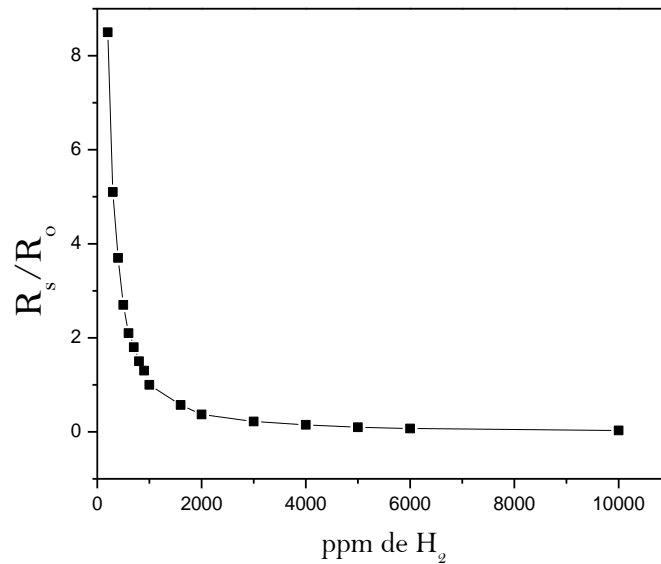
Para la obtención de la función se localizan los puntos de concentración (ppm) y de resistencia (R_s/R_o) de la curva de hidrógeno como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 4. Valores de concentración y de resistencia para el gas hidrógeno.

ppm de H ₂	R _s /R _o
200	8.5
300	5.1
400	3.7
500	2.7
600	2.1
700	1.8
800	1.5
900	1.3

1000	1
1600	0.57
2000	0.37
3000	0.22
4000	0.15
5000	0.095
6000	0.07
10000	0.03

Con los datos anteriores se obtiene la Gráfica 1 y la ecuación que la define:



Gráfica 1. Curva de la concentración de hidrógeno.

Ecuación de la curva:

$$y = 20806x^{-1.44} \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9966 \quad (2)$$

Remplazando "y" y "x":

$$\frac{R_s}{R_o} = 20806(ppm)^{-1.44}$$

$$R_s = (R_o)(20806)(ppm)^{-1.44}$$

En donde:

R_s = resistencia para varias concentraciones del gas

$ppm = \text{concentración del } H_2 \text{ en partes por millón}$

$R_0 = \text{resistencia del sensor a } 1,000 \text{ ppm de } H_2$

Para calcular la resistencia del sensor en función de su voltaje de salida se hace uso de la ecuación de un circuito divisor resistivo.

$$V_s = \frac{R_l}{R_s + R_l} \cdot V_{cc}$$

En donde R_s es igual a:

$$R_s = \frac{V_{cc} - V_s}{V_s} \cdot R_l$$

Igualando R_s se obtiene:

$$(R_0)(20806)(ppm)^{-1.44} = \frac{V_{cc} - V_s}{V_s} \cdot R_l$$

Se obtienen los siguientes valores de la hoja de datos del sensor:

$$R_l = 10 \text{ K}\Omega$$

$$V_{cc} = 5V$$

$$R_0 = 1 \text{ K}\Omega$$

Sustituyendo valores y despejando ppm , se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} ppm^{-1.44} &= \frac{5 - V_s}{V_s} \cdot \frac{10}{R_0 \cdot 20806} \\ \ln(ppm)^{-1.44} &= \ln\left(\frac{5 - V_s}{V_s} \cdot \frac{10}{R_0 \cdot 20806}\right) \\ -1.44 * \ln(ppm) &= \ln\left(\frac{5 - V_s}{V_s} \cdot \frac{10}{R_0 \cdot 20806}\right) \\ ppm &= e^{\frac{\ln\left(\frac{5 - V_s}{V_s} \cdot \frac{10}{R_0 \cdot 20806}\right)}{-1.44}} \end{aligned}$$

La ecuación se programa en LabView para convertir los valores analógicos del sensor en ppm. Dicha ecuación sólo se aplica a sensores MQ-8 para el gas hidrógeno.

Se realizaron pruebas de funcionamiento correcto de los sensores, así como del funcionamiento del programa, y se realizaron las modificaciones necesarias a este como los tiempos de impresión de datos, el almacenamiento de datos y las conexiones de los sensores a los relevadores.

- Objetivo específico 6: Implementación del sistema de control en el equipo.

Para la implementación de los elementos del lazo de control en el sistema modular de reacción, se realizaron diferentes cubiertas y elementos mecánicos que protegen y dan soporte a éstos. El sensor adquirido es un módulo el cual tiene sus conexiones expuestas al gas hidrógeno, poniendo en riesgo que lo incendie debido a una chispa que pueda generar el sensor, por lo tanto, se diseñó una capucha la cual recubra el módulo y que facilite su montaje en el módulo de reacción.

Para el diseño, primero se obtuvieron las medidas del sensor, las cuales son las siguientes: para la placa se tiene un rectángulo de 3.2 cm de ancho por 1.9 cm de largo con un grosor de 0.15 cm; el sensor cuenta con un diámetro de 1.9 cm y una altura de 1.6 cm. La medida de los pines es de 0.7 cm de largo con un espesor de 0.1 cm. En la Figura 34 se muestran algunas dimensiones del sensor MQ-8.

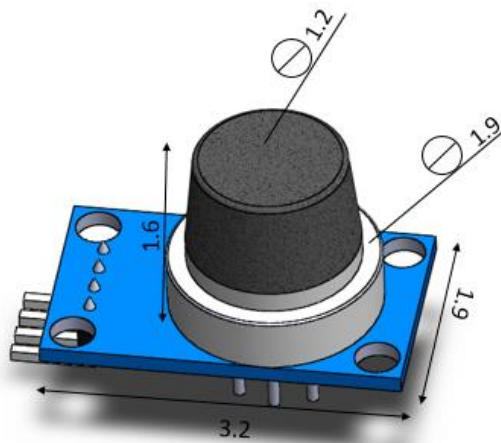


Figura 34. Dimensiones del sensor MQ-8.

En el software SolidWorks se diseñaron las partes de la cubierta y posteriormente se imprimieron en 3D, debido a que no existen en el mercado cubiertas para estos sensores.

En la Figura 35 se observa las diferentes posiciones que puede tener el sensor ya que el soporte le permite al sensor tener una movilidad de 180°.

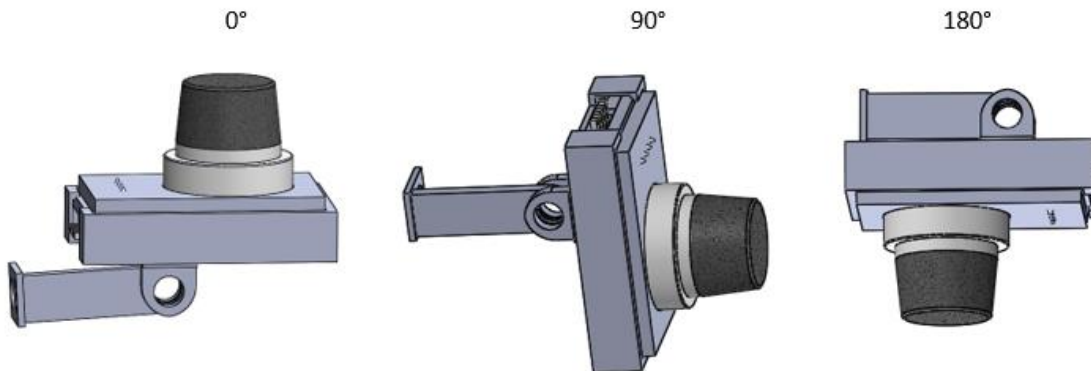


Figura 35. Movimiento del sensor.

Para acoplar los elementos del lazo de control como se mostró en la Figura 28, fue necesario realizar una soldadura blanda con estaño para fijar el cableado.

Equipo de monitoreo portátil

A partir de la configuración original del hardware del lazo de control, se realizó un equipo de monitoreo portátil debido a la variabilidad del proceso y al número limitado de sensores que se pueden montar en el equipo, ya que estos pueden ser un factor de peligrosidad adentro del módulo porque se puede generar una chispa durante el funcionamiento de los sensores.

El equipo portátil se compone de una placa Arduino Mega 2560, el cual controla a una pantalla táctil ILI 9341, que permite la introducción de datos a través de los algoritmos de programación. En la Figura 35 y en la Tabla 5 se muestra la conexión entre el controlador y la pantalla táctil.

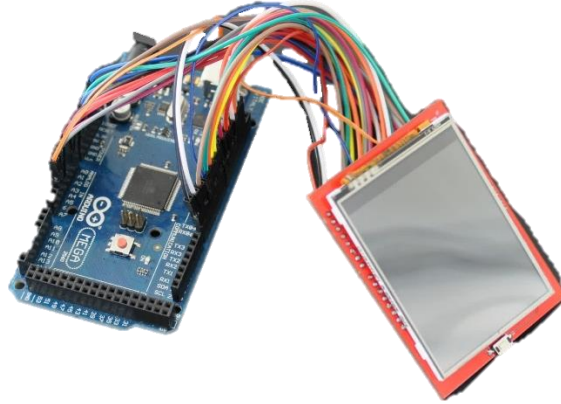


Figura 36. Conexión entre la placa Arduino y la pantalla táctil.

Tabla 5. Conexión entre pines de la placa Arduino y la pantalla táctil.

Pin LCD	Pin Arduino
GND	GND
5 V	5 V
3.3 V	3.3 V
LCD_D0	D8
LCD_D1	D9
LCD_D2	D2
LCD_D3	D3
LCD_D4	D4
LCD_D5	D5
LCD_D6	D6
LCD_D7	D7
LCD_RST	A4
LCD_CS	A3
LCD_RS	A2
LCD_WR	A1
LCD_RD	A0
SD_SS	D10
SD_DI	D11
SD_D0	D12
SD_SCK	D13

El software de la pantalla cuenta con datos de presentación, una pantalla de espera para preparar al sensor y un menú, en el cual se muestran los gases que pueden ser detectados por los sensores. Una vez seleccionado el gas, se debe seleccionar el sensor con el que se monitoreará, en la pantalla se mostrará el sensor y el gas seleccionado y los valores leídos por el sensor en unidades de ppm.

Los sensores del equipo son desmontables para seleccionar el sensor adecuado de acuerdo al gas a monitorear. En la Tabla 6 se muestran los sensores junto al gas que se pueden utilizar en el equipo portátil.

Tabla 6. Sensores para el equipo de monitoreo.

Sensor	Gases monitoreados
MQ-2	Gas LP, propano, metano, alcohol, hidrógeno
MQ-3	Alcohol, bencina, hexano monóxido de carbono, metano
MQ-6	Gas LP, metano, hidrógeno, alcohol
MQ-8	Hidrógeno, gas LP, metano, alcohol
MQ-135	Amoníaco, óxidos de nitrógeno, benceno, alcohol

En la Figura 36 se presenta la conexión entre la placa arduino, la pantalla táctil y el sensor de gas.

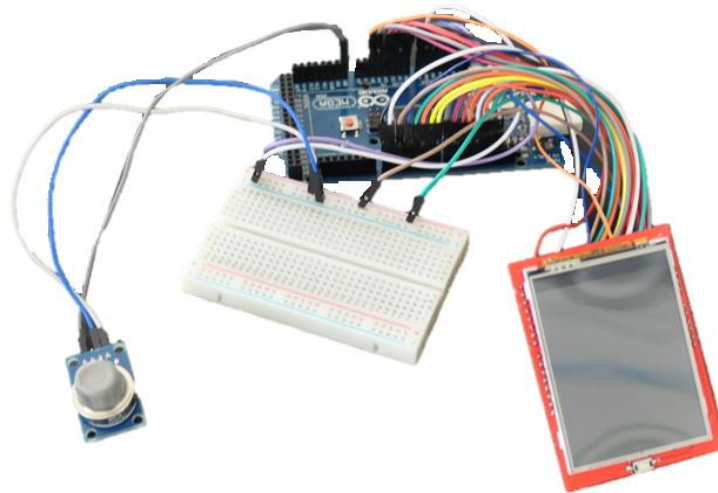


Figura 37. Conexión entre los elementos del equipo portátil.

Conclusión

Con la caracterización del módulo se obtuvieron las dimensiones y volúmenes del módulo de reacción, así como la identificación y cuantificación de los elementos que conforman al proceso de reacción, con la finalidad de observar los sitios propensos a fugas del gas.

Se realizaron los diseños generales e individuales de los elementos que conforman al módulo de reacción en un software CAD para permitir la visualización de diferentes perspectivas del equipo.

Para la selección del sensor y del controlador adecuados se compararon parámetros de funcionabilidad, compatibilidad y estructurales. El sensor MQ-8 en conjunto con la placa Arduino Mega permiten el vínculo con los actuadores conformados por el sistema de venteo y el relevador que provee energía al proceso. Para visualizar las conexiones entre cada elemento se realizaron diseños bifilares.

Se efectuaron los protocolos de vinculación entre los softwares LabVIEW y Arduino para la realización del algoritmo en lenguaje C+, en donde, se programaron las condiciones para el funcionamiento del lazo de control. Se propusieron los límites de concentración de hidrógeno de acuerdo a la norma ISO/TR 15916, la cual establece los límites de explosividad del hidrógeno gaseoso, cuando el límite propuesto fue sobrepasado, el sistema de venteo se accionó.

La realización del panel de control ayudó a monitorear las lecturas de los sensores, así como la visualización de las lecturas de concentración de hidrógeno. Además, el programa realiza una base de datos en donde resguarda las lecturas leídas por el sensor junto con la fecha y la hora.

La calibración se realizó de acuerdo a la recomendación de la ficha técnica del sensor, la cual es por medio de la linealización de la gráfica de concentración con la relación de la resistencia, dicha ecuación fue programada en el algoritmo de programación del sensor. Al realizar las pruebas, se modificó la resistencia del sensor para obtener resultados fidedignos.

La implementación del lazo de control en el módulo ayudó a realizar las modificaciones pertinentes a las conexiones y al algoritmo para su correcto funcionamiento.

Se realizó un dispositivo portátil, el cual ayudó a detectar de manera más precisa la concentración de hidrógeno en un área puntual específica. Además, dicho equipo permite la lectura de otros gases con la implementación del sensor correcto.

Bibliografía

- Abdel-Aal, H. (2015). Water is the ultimate source of hydrogen energy: scientific citations and quotations. En I. Dincer, O. Colpan, O. Kizilkan, & A. Ezan, *Progress in clean energy*. Switzerland: Springer.
- AFHYPAC, A. F. (2011). *Historique de l'hydrogène*. France: HYNOVATIONS.
- AFHYPAC, A. F. (2011). *Historique de l'hydrogène*. France.
- Alonso, F. (1997). *Deflagraciones producidas por gases, vapores y polvos combustibles: sistemas de protección*. España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Darkrim-Lamari, F. (2008). *Combustible hydrogène*. France: Centre Francaise d'exploitation.
- Dräger Safety Hispania, S. (2009). *Introducción a los sistemas de detección de gases*. Madrid: Marketing Communications.
- Editors of Encyclopedia Britannica, E. (2018). *BRITANNICA*. Obtenido de BRITANNICA: <http://www.britannica.com/biography/Francis-Thomas-Bacon>
- EPEC. (s.f.). *Faraday y la electrólisis*. Córdoba: Empresa Provincial de Energía de Córdoba.
- Gutiérrez, L. (2005). El hidrógeno, combustible del futuro. *Real Academia de Ciencias Exactas, Física y Naturales*, 49-67.
- Gutiérrez, L. (2005). El hidrógeno, combustible del futuro. *Real Academia de Ciencias Exactas, Física y Naturales*, 49-67.
- Henriksen, M. e. (2017). Accidental hydrogen release in a gas chromatograph laboratory: A case study. *International Journal of hydrogen Energy*, 7651-7656.
- Hunter, G. (1995). *A hydrogen leak detection system for aerospace and commercial applications*. United States: NASA Technical Memorandum.
- Inoue, M. (2016). Hydrogen Gas Safety Management. En K. Sasaki, H.-W. Li, A. Hayashi, & J. Yamabe, *Hydrogen Energy Engineering: a japanese perspective* (págs. 385-395). Japan: Springer.
- International Organization for Standardization, I. (2004). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. Switzerland: ISO 2004.
- International Standard, I. (2011). *ISO 22734-2*. Suiza: International Organization for Standardization.
- Ito, K., Li, H., & Hao, Y. M. (2011). Alkaline Water Electrolysis. En K. Sasaki, H.-W. Li, A. Hayashi, & J. Yamabe, *Hydrogen Energy Engineering: a japanese perspective* (págs. 137-142). Japan: Springer Japan.

- Lee, I., & Lee, M. (2016). A study on the optimal design of a ventilation system to prevent explosion due to hydrogen gas leakage in a fuel cell power generation facility. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 18663-18686.
- Lehner, M. (2014). Water electrolysis. En M. Lehner, R. Tichler, & H. Steinmüller, *Power-to-gas: technology and business models* (págs. 19-39). London: Springer.
- Mihura. (2001). *Learning LabVIEW for the first time*. Prentice Hall.
- Naterer, G., Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2013). *Hydrogen production from nuclear energy*. London: Springer-Verlag.
- NFPA. (2007). *Standard for ovens and furnaces*. Massachusetts: National Fire Protection Association.
- NFPA, N. F. (1991). *Standards for Ovens and Furnaces*. United states: NFPA.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: PEARSON.
- Okano, K. (2016). Development Histories: Hydrogen Technologies. En K. Sasaki, H.-w. Li, A. Hayashi, & J. Yaname, *Hydrogen energy engineering: a japanese perspective* (págs. 53-92). Japan: Springer .
- PEMEX. (2010). *NRF-045-PEMEX-2010. Seguridad funcional-sistemas instrumentados de seguridad*. México: Subcomité Técnico de Normalización de PEMEX.
- Rohner, P. (1996). *Automation with programmable logic controllers*. Australia: UNSW PRESS.
- SAFETY, U. C. (Agosto de 2015). CSB. Obtenido de CSB: <http://www.csb.gov/chemical-safety-board-uncovers-flaws-at-the-dupont-insecticide-plant-in-la-porte-texas-where-four-chemical-workers-died/>
- Sánchez, V. (8 de Enero de 2018). *ISA InTech México*. Obtenido de ISA InTech México: <http://isamex.org/intechmx/index.php/2018/01/08/instrumentacion-para-la-seguridad/>
- Sasaki, K., Li, H.-w., Hayashi, A., Yamabe, J., Ogura, T., & Lyth, S. (2016). *Hydrogen energy engineering: a japanese perspective*. Japan: Springer.
- Smith. (1991). *Control automático de procesos: teoría y práctica*. México: Limusa.
- Smith, C. (1991). *Control automático de procesos: Teoría y práctica*. México: LIMUSA, S.A de C.V.
- Standard, E. (2007). *EN 60079-29-2: Explosive atmospheres*. UK: Norma British Standard.
- Yagyu, S. (1977). *Flammable limits of gas and vapor*. Tokyo: Japan Society for Safety Engineering.

