

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TÍTULO DE LA TESIS

“Diseño e implementación de sistema de filtrado y diagnóstico de fugas para una celda de combustible alimentada con biohidrógeno”

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Ociel Isidro Conde Rosas

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Albino Martínez Sibaja

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. José Pastor Rodríguez Jarquin

Fecha: Noviembre 2020



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Fecha: **Junio 2**, de 2020
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

OCIEL ISIDRO CONDE ROSAS

La cual lleva el título de:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE FILTRADO Y DIAGNÓSTICO DE FUGAS
PARA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE ALIMENTADA CON BIOHIDRÓGENO**

Y concluyen que se acepta.

PRESIDENTE: DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA

FIRMA

SECRETARIO: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

FIRMA

VOCAL: DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES
CUAUTLE

FIRMA

VOCAL SUP.: M.C. BLANCA ESTELA GONZÁLEZ
SÁNCHEZ

FIRMA

ATENTAMENTE

FTI-TI-013



CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PROBLEMÁTICA.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4 HIPÓTESIS.....	7
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.7 ESTADO DEL ARTE.....	9
1.7.1 Absorción de CO ₂	9
1.7.2 Limpieza de Biogás.....	14
1.8 Conclusión del capítulo.....	17
CAPÍTULO II. Marco teórico.....	18
2.1 Conceptos generales.....	18
2.2 Sensores resistivos.....	19
2.2.1 Sensores de gas.....	20
2.2.2 Funcionamiento de sensores de gas.....	20
2.3 Sensores Capacitivos.....	21
2.3.1 Reactancia.....	21
2.3.2 Tipos de reactancia.....	21
2.3.3 Condensador Variable.....	21
2.3.4 Sensores capacitivos de proximidad.....	22
2.4 Potencial de hidrógeno (PH).....	23
2.4.1 El mol.....	24
2.4.2 Molaridad.....	24

2.5 Medición de pH	24
2.5.1 Indicadores	25
2.5.2 El pH-metro	25
2.5.3 Sonda pH	26
2.6 Hidróxido de sodio (NaOH)	26
2.8 Fotodiodo	27
2.9 Sensor de color arduino	28
2.10 Conclusión del capítulo	31
CAPÍTULO III. Diseño e implementación	32
3.1 RESUMEN CAPÍTULO	32
3.2 Calculo para la concentración	34
3.2. Diseño en CAD	36
3.3 Implementación de los depósitos cilíndricos	49
3.3.1 Soporte de sensores.....	54
3.4 Diseño de la segunda propuesta de depósito	55
3.5 Implementación de los depósitos rectangulares	65
3.5.1 Filtro de kalman.....	70
3.6 Diagnóstico de fugas	72
CAPÍTULO IV. Desarrollo experimental y análisis de resultados	75
4.1 RESUMEN CAPÍTULO	75
4.2 Metodología de experimentación.....	75
4.3 Disolución de NaOH y fenolftaleína	76
4.3.1 Cambio de coloración.....	77
4.3.2 Cambio de coloración.....	78
4.3.3 Curva de decoloración.....	81
4.4 Experimentación en el segundo depósito	83

4.5 RESULTADOS	84
CONCLUSIONES	88
TRABAJO FUTURO.....	89
REFERENCIAS.....	90

Lista de Figuras

Figura 1 Tipos de celdas de combustible	2
Figura 2 Funcionamiento de la celda [1]	3
Figura 3 Funcionamiento sensor capacitivo.....	23
Figura 5 Pines del TCS3200 – Texas Advanced Optoelectronic Solutions [13]	28
Figura 4 Integrado CMOS	28
Figura 6 Diagrama sensor de color - Texas Advanced Optoelectronic Solutions [13]	28
Figura 7 Matriz de fotodiodos y sensor de color.....	29
Figura 8 Calibraciones de color	30
Figura 9 Calibración ciclo de trabajo	30
Figura 10 Esquema de filtrado.....	33
Figura 11 Diseño de depósito.....	37
Figura 12 Tapón de purga.....	37
Figura 13 Sensor de CO ₂ y simulación de montaje de sensores.....	38
Figura 14 Medidas del sensor MQ.....	38
Figura 15 Conexión de sensor MQ	39
Figura 16 Diseño del sensor capacitivo	41
Figura 17 Conexión sensor capacitivo	42
Figura 18 Simulación montaje y despiece	48
Figura 19 Diseño de esquema de filtrado	48
Figura 20 Depósito cilíndrico.....	49
Figura 21 Tapa depósito cilíndrico	50

Figura 22 Empaque	51
Figura 23 Conexión de acoplamiento	51
Figura 24 Manguera de silicón	52
Figura 25 abrazadera metálica	52
Figura 26 Extensión de vidrio	53
Figura 27 Soporte depósito y sensores	53
Figura 28 Base para los depósitos	54
Figura 29 Bases para sensores	54
Figura 30 Diseño ortoedro	56
Figura 31 Perforaciones ortoedro	57
Figura 32 Instalación conectores.....	57
Figura 33 Diseño de depósito.....	57

Figura 34 Salida de drenado	58
Figura 35 Portaobjetos	58
Figura 36Diseño TCS	59
Figura 37 Conexión TCS	60
Figura 38 Bases de los sensores	63
Figura 39 Diseño de instalación de sensores	63
Figura 40 Simulación de montaje.....	64
Figura 41 Ensamble de depósitos.....	64
Figura 42 Perforación de vidrio	65
Figura 43 Colocación de conector	66
Figura 44 Colocación de portaobjetos	66
Figura 45 Extensión de vidrio	67
Figura 46 Pegado de vidrio.....	67
Figura 47 Base metálica.....	68
Figura 48 Montaje de depósitos.....	68
Figura 49 Instalacion de sensor y led	69
Figura 50 Sensores diagnóstico de fugas	69
Figura 51 Código matlab	70
Figura 52 Bloque filtro de kalman	70
Figura 53 Configuración from workspace	71
Figura 54 Función algoritmo de kalman.....	71
Figura 55 Interfaz gráfica.....	72
Figura 56 Comportamiento del color	73
Figura 57 Cambio de color en interfaz	73
Figura 58 Detección de fugas NaOH.....	74
Figura 59 Detección fuga de hidrógeno	74
Figura 60 Solución son fenolftaleína	76
Figura 61 Introducción de CO ₂	77
Figura 62 Cambio de coloración.....	77
Figura 63 Gráfica de la curva y carbonato de sodio	78
Figura 64 Medición de sonda pH.....	78
Figura 65 Gráfica en Excel mediciones de color.....	79

Figura 66 Programación VBA.....	79
Figura 67 Gráficas de color.....	80
Figura 68 Distribuciones de los datos.....	80
Figura 69 Grafica de cada color.....	81
Figura 70 Gráficas de valores realizadas en matlab.....	81
Figura 71 Filtro de kalman.....	82
Figura 72 Embudo de llenado.....	83
Figura 73 Depósitos llenos de NaOH.....	83
Figura 74 Inicio de decoloración.....	84
Figura 75 Decoloración.....	84
Figura 76 Sedimentación.....	85
Figura 77 Filtro de kalman.....	85
Figura 78 Mediciones de dióxido de carbono.....	86
Figura 79 Interfaz gráfica.....	87

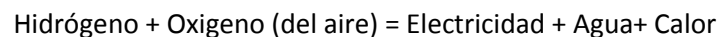
Lista de Tablas

Tabla 1 Componentes del biohidrógeno.....	6
Tabla 2 Descripción del pH.....	24

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El principio de operación de una celda de combustible tiene ya bastante tiempo. Este principio fue introducido por dos investigadores (Christian Friedrich Schönberg y William Grove) en 1839. El principio está basado en la reacción entre dos gases: hidrógeno usado como combustible y oxígeno usado como oxidante. La operación principal de la celda de combustible es relativamente sencilla: puede ser descrita como electrolisis inversa. Más precisamente, consiste en una combustión electroquímica controlada entre el oxígeno y el hidrógeno resultando en la producción simultánea de electricidad, agua y calor, siguiendo la fórmula general:



Esta reacción química toma lugar en un sistema el cual consiste en dos electrodos (cátodo y ánodo) separados por un electrolito. Dependiendo del tipo de la celda de combustible, la reacción puede tomar lugar a diferentes temperaturas, de algunas docenas de grados Celsius para la celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM) a casi mil grados Celsius para la celda de combustible de óxido sólido por ejemplo.

Aunque este principio de operación es válido para todo tipo de celdas de combustible, las diferencias en los electrolitos y temperaturas resultan en diferentes características para diferentes tipos de celdas de combustible, así que están más o menos adaptadas para ciertas aplicaciones.

Existen varias tecnologías de celdas de combustible, donde cada tecnología tiene sus ventajas y desventajas específicas. Estas ventajas y desventajas las hacen adaptables a ciertas aplicaciones, por ejemplo las celdas de combustibles de bajas temperaturas tales como la PEM o la pila de combustible alcalina (AFC, o Alkaline Fuel Cell por su traducción del inglés) operan más rápido que las celdas de combustibles de altas temperaturas, las cuales las hacen más adaptables a otras celdas para aplicaciones de transportación. Sin embargo estas celdas de bajas temperaturas requieren cantidades más altas de catalizador e intercambiadores de calor más robustos, debido a la pequeña diferencia de temperaturas entre la celda de combustible y el ambiente: estas restricciones las hacen menos aptas para aplicaciones de transportación, en el cual la restricción de espacio es una cuestión clave. Para las celdas de altas temperaturas, ocurre justo lo contrario, tienen un tiempo

de operación relativamente largo pero requieren menos espacio debido a los intercambiadores de calor más pequeños.

La elección del tipo de celda de combustible para alguna aplicación dada es por lo tanto siempre un compromiso entre sus ventajas inherentes y desventajas. Para superar ciertos inconvenientes, los investigadores centran su atención en:

Incrementar la temperatura de operación de la celda de combustible de baja temperatura (a aproximadamente 120°C) para aplicaciones en transporte, con el fin de reducir el tamaño de la celda y mejorar la gestión del agua. Disminuir la temperatura de operación de las celdas de combustible de altas temperaturas, de este modo reducir la restricción térmica, el tiempo de puesta en marcha y los costos, mientras tanto extendiendo el tiempo de vida de la celda de combustible.

La temperatura de operación de una celda de combustible parece estar alrededor de 150°C-200°C, pero esta temperatura a su vez tiene otras desventajas. La clasificación de las celdas de combustibles se basada principalmente en el tipo de electrolito, debido a que el electrolito determina la temperatura de operación de la celda y el tipo de ion el cual asegura la conducción iónica. Las tecnologías más comúnmente utilizadas son las siguientes:

Tipos de Celdas	Acrónimo	Electrolito	Temperatura de operación	Aplicaciones
Celda de combustible de intercambio protónico.	PEFC/PEMFC	Membrana de polímero sólido.	80 °C	Transporte, inmóviles o estacionarias, portables.
Celda de combustible Alcalina.	AFC	Hidróxido de potasio.	60 °C–250 °C	Transporte, inmóviles o estacionarias.
Celda de combustible de Ácido fosfórico.	PAFC	Ácido fosfórico	200 °C	Inmóviles o estacionarias (Cogeneración).
Celda de combustible de carbonatos fundidos.	MCFC	Carbonatos de metales alcalinos	600 °C–800 °C	Inmóviles o estacionarias (Cogeneración).
Pilas de combustible de óxido sólido.	SOFC	Cerámico	800 °C–1000 °C	Transporte, inmóviles o estacionarias (Cogeneración).
Pilas de combustible de óxido sólido de temperatura intermedia.	IT-SOFC	Cerámico	550 °C	Transporte, inmóviles o estacionarias (Cogeneración).
Pila de combustible de Metanol.	DMFC	Membrana de polímero	80 °C	Transporte, inmóviles o estacionarias, portables.

Figura 1 Tipos de celdas de combustible

Para este proyecto se determinó de acuerdo al rango de temperatura de operación y las aplicaciones que la celda de combustible de membrana de intercambio protónico es la más idónea y cuyo funcionamiento se describe a continuación.

La celda de combustible es alimentada por hidrógeno en el ánodo (terminal negativa) y oxígeno en el cátodo (terminal positiva); las moléculas de hidrógeno son separadas a través de una reacción catalítica basada en platino y cada átomo de hidrógeno pierde su único electrón. Ya que el electrón no puede pasar a través de la membrana (aislante), pasa a través del circuito eléctrico creando una corriente eléctrica. Sin su electrón, el ion de hidrógeno (ahora un protón H^+) puede pasar a través de la membrana al cátodo; los electrones vienen del ánodo a través del circuito eléctrico, emigrando protones del ánodo a través de la membrana y las moléculas de oxígeno se combinan en el cátodo para formar moléculas de agua conteniendo dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (H_2O).

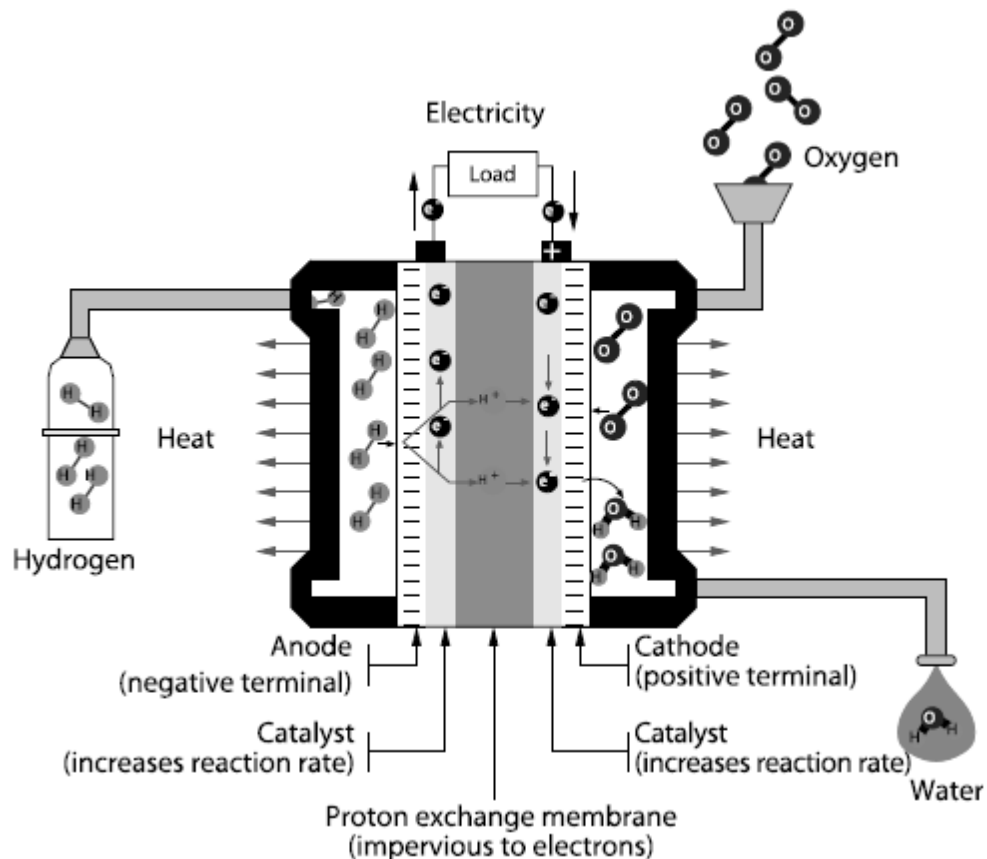


Figura 2 Funcionamiento de la celda [1]

El agua y la electricidad son así producidas, pero debido a que la reacción no es ideal, también es producido calor que puede ser aprovechado para diferentes propósitos. La celda de combustible es

un convertidor de energía, y no una fuente de energía, convierte la energía química del combustible (hidrógeno) directamente a electricidad y calor.

El proceso de conversión del hidrógeno a electricidad no es contaminante, ya que solo el subproducto es agua. El combustible, el hidrógeno es un portador de energía, no es una fuente de energía ya que requiere energía para su adquisición debido a que en la naturaleza solo se puede encontrar en pequeñas porciones. Otro medio de obtención es por medio de otros recursos como gasolina, metanol, etanol, biomasa por ejemplo después de un proceso o producido por electrolisis del agua en la cual separa las moléculas de agua a hidrógeno y oxígeno, posee gran densidad de energía por unidad de volumen. La celda de combustible tipo PEM opera a temperaturas por debajo de los 100°C, el electrolito de la celda es generalmente una membrana de polímero perfluorado.

Las principales ventajas de esta celda son:

- El electrolito es sólido: no hay riesgo de fuga;
- La temperatura de operación es baja, lo cual significa que la celda no requiere mucho tiempo de calentamiento antes de ser operada completamente.
- El poder específico es alto, tan alto como de 1kW/kg;

Sin embargo, tiene sus propias desventajas:

- La membrana debe mantenerse en un buen grado de hidratación para transferir protones de hidrógeno. Si esta condición no se cumple, está el riesgo de que la membrana se deteriore, lo que conduciría a la degradación de la celda de combustible.
- La necesidad de usar platino hace a la celda susceptible a contaminación de monóxido de carbono (CO), el cual envenena los sitios donde se realiza la catálisis.

Estructura de la celda de combustible tipo PEM

La celda de combustible tipo PEM consiste en una composición de más celdas de combustible, donde cada celda representa una capa la cual realiza diferentes funciones. Una celda de combustible consta de dos partes fundamentales:

- Placa bipolar: La cual permite la entrada del gas, recibe la corriente eléctrica, forma parte del soporte de la celda y para el enfriamiento.
- Conjunto membrana electrodo la cual puede ser dividida en tres sub-partes: La capa porosa de difusión, la capa del catalizador y la membrana

1.2 PROBLEMÁTICA

El platino es hasta ahora el mejor catalizador para la oxidación del hidrógeno, y para la absorción de combustibles que contienen átomos de carbono, el principal problema consiste en lo que se le denomina envenenamiento durante el proceso de catálisis el cual hace referencia a la pérdida de zonas activas del platino en el ánodo debido a la absorción de dióxido de carbono lo que inhabilita los sitios activos para la reducción del combustible.

Al perder estas partes activas el platino, la potencia de la celda se ve afectada, de acuerdo a investigaciones por ejemplo, cantidades mínimas como 100 ppm de CO en el gas del ánodo disminuye la potencia en la salida de la celda pudiendo alcanzar un 25% en comparación con el valor que se obtiene utilizando hidrógeno con un alto grado de pureza. [2]

Otros estudios presentados en este trabajo muestran cuantitativamente el envenenamiento de platino expuesto a una mezcla de 1% CO / H₂, en ese estudio se halló que a 25 °C, el 98% de los sitios activos se pierden debido a la presencia de CO. [2]

Otros estudios demostraron que aún 5 ppm de CO en el bio-hidrógeno causa disminuciones en la potencia por la pérdida de zonas activa para una corriente a partir de 400 mA/cm². También existe una pérdida de tensión por el envenenamiento con CO a la entrada de la celda. Por ejemplo para una corriente de 700 mA/cm² la tensión rodea los 400 mV si las cantidades de CO se incrementan de 0 a 20 ppm, por lo tanto si las concentraciones van de las de 20ppm a 100 ppm la tensión cae a los 100 mV.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las celdas pueden trabajar con diferentes tipos de combustibles, debido a sus propiedades el hidrógeno es la mejor opción principalmente por su rendimiento y emisión de CO.

El biohidrógeno producido con un biodigestor contiene hidrógeno a una pureza del 70% aproximadamente, junto con otros componentes como se muestra en la tabla 1 que en su mayoría es CO₂ y gas metano los cuales envenenan el platino de la celda reduciendo su ciclo de vida a solo unas horas.

Componente	Unidad	Contenido
Metano	%	50-75
Dióxido de carbono	%	30-45
Nitrógeno	%	1--2
Oxígeno	%	0.1
Sulfuro de Hidrógeno	%	0.01 - 0.4
Vapor de agua	%	80 - 100

Tabla 1 Componentes del biohidrógeno

Por lo anterior, en este proyecto se aborda la problemática de diseñar e implementar un esquema de filtrado y diagnóstico de fugas que permita operar en modo continuo una celda tipo PEM alimentada con biohidrógeno. Absorbiendo solo el CO₂ contenido en el gas evitando el deterioro del catalizador de la celda.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible desarrollar un esquema de filtrado y diagnóstico de fugas de una celda de combustible tipo de membrana de intercambio protónico que permita operar en modo continuo dicha celda cuando es alimentada con biohidrógeno.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un esquema de filtrado y diagnóstico de fugas para una celda de combustible tipo PEM alimentada con biohidrógeno.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un filtro físico a la entrada de la celda tipo PEM.
- Diseñar el montaje de un sensor de color TCS3200 para estimar la capacidad de absorción del hidróxido de sodio
- Diseñar un sistema de sensores que detecte fuga de hidrógeno en los filtros.
- Diseñar el montaje de sensores capacitivos de proximidad para monitorear el nivel de la solución NaOH.
- Diseñar una interface gráfica para la visualización del proceso del cambio de coloración en la solución de NaOH.
- Realizar el trámite de solicitud de registro de modelo de utilidad o registro de software del esquema de filtrado y diagnóstico de fugas desarrollado.

1.7 ESTADO DEL ARTE

1.7 .1 Absorción de CO₂

En el artículo [2] antes citado en donde se expone el efecto del dióxido de carbono en las celdas de combustible, en este trabajo se estudia cinco estrategias para poder utilizar biogás en la generación de electricidad con celdas de combustible:

- 1.- Reducir el potencial al comienzo de la reacción de oxidación.
- 2.-Disminución de la cantidad de CO capturado.
- 3.- Emplear cantidades minimas de oxígeno en el biogás suministrado en la entrada.
- 4.- Elevar la temperatura en la operación.
- 5.- Purificación del biogás antes de la entrada de la celda

Propone que el dispositivo de limpieza debe ser ubicado al interior de la celda el cual cita a [Rohland y Plzak (1999)], en donde se propone el uso de una hoja catalizadora de oro, ubicada a la entrada del gas que alimenta al ánodo. De acuerdo al estudio esta hoja logra una oxidación selectiva del CO, logrando solo el paso de hidrógeno hacia el catalizador.

Empleando una idea semejante citando [Huang et al., (2002a y 2002 b)] en donde se coloca una capa de rutenio (al cual llamaron “filtro”) en la parte más externa del ánodo para recibir la corriente con CO. Se postula que el filtro de rutenio promueve la reacción de oxidación de CO, ya que la cinética de reacción de H₂ en rutenio es muy baja.

También se cita a [Yu et al., (2002)] el donde se propone un electrodo compuesto en el cual la capa adyacente a la entrada de los gases se compone de una mezcla PtRu (la cual se emplea para catalizar la oxidación de CO) y de una capa más interna compuesta de Pt (para catalizar la oxidación de hidrógeno). En la configuración propuesta la capa más externa contiene la mayor cantidad del catalizador, mientras que internamente se utiliza una capa delgada con mucha menor cantidad de catalizador. Esto representa un mejoramiento aparente sobre la estructura convencional.

Y finalmente y más recientemente cita a [(Santiago et al., 2004)] en donde se propone el montaje de un catalizador Mo/C en la capa de difusión del ánodo y empleando Pt/C, PtRu/C or PtMo/C en la capa catalítica. Esta estructura presenta un aumento de la actividad catalítica a la oxidación de hidrógeno en presencia de CO, la cual fue atribuida a una más baja concentración de CO que llega al catalizador debido a la reacción de desplazamiento de agua, la cual es catalizada por el Mo/C.

Siendo el principal objetivo de esta tesis el filtrado de CO₂ del bio-hidrógeno, se investigaron una serie de métodos en la absorción de CO₂ determinando el más apropiado, así como se revisaron trabajos sobre la reacción que existe entre el CO₂ y los recursos utilizados en artículos mencionados, por otra parte, se revisaron trabajos referentes a la celda de combustible en donde proponen métodos para trabajar con CO₂ sin que este dañe la celda. Y finalmente se hace una descripción general de propuestas para capturar CO₂ determinando que el uso de hidróxido de sodio para absorber CO₂ es idóneo para este proyecto por la practicidad en su adquisición y bajo costo.

De acuerdo a investigaciones [3] donde proponen nuevas tecnologías en las cuales se mencionan celdas o células de combustible de Hidrógeno generadoras de energía limpia. Ya que los productos de reacción no generan compuestos tóxicos al medio ambiente, pero partículas del aire de entrada a la celda como el monóxido de Carbón o CO₂ pueden dañar la membrana. Se analiza el diseño de un filtro de zeolita, éste material cerámico tiene una gran área de contacto, es selectivo a la molécula de Oxígeno y elimina sustancias con menor tamaño de partícula. Lo que representa una alternativa para evitar el envenenamiento de la membrana de intercambio protónico en una celda de combustible de Hidrógeno. Se construyó el filtro y se evaluó la cantidad de partículas de monóxido de Carbón a la entrada y salida del mismo. Se realizaron pruebas al interior de laboratorio y en un ambiente expuesto a contaminantes. Como resultado de las pruebas en el laboratorio los datos obtenidos se tomaron como control y no fueron significativos mientras que en el exterior se obtuvo la reducción del 66 % de las partículas de monóxido de Carbón que salen del filtro. Con lo anterior se concluye en esta prueba que la zeolita filtra y cumple la función esperada. Asimismo se pretende utilizarla para disminuir el envenenamiento de la membrana con el propósito de aumentar su eficiencia.

En otro trabajo [4] se describe un proceso de fermentación oscura fue integrado con un sistema de celdas de combustible con membrana de intercambio protónico para la generación de electricidad. El sistema de producción de H₂ fue un bioreactor anaeróbico continuamente agitado. Para la

limpieza del hidrógeno el biogás es bombeado dentro de un absorvedor de CO_2 el cual está compuesto por dos botellas conectadas en serie. -Cada botella contiene 2L de solución NaOH, capturando la entrada de gas CO_2 mediante una rápida reacción de NaOH y CO_2 a la forma $NaHCO_3/Na_2CO_3$. El flujo resultante que contiene H_2 y vapor de agua fue entonces introducido a una columna llena de collares de silica-gel para remover el vapor de agua teniendo como resultado hidrógeno con una pureza mayor al 99%. En la siguiente grafica se muestran el comportamiento de la producción de hidrógeno y la absorción de CO_2

En otro trabajo [5] el biohidrógeno fue producido del almidón de aguas residuales por medio de la fermentación anaerobia. Los efectos de los parámetros, tales como pH, Se investigaron la concentración de almidón y las condiciones de operación óptimas fueron determinadas. La óptima concentración de pH y almidón para la producción de hidrógeno a 37 °C fue de 6.5 y 5 g/L, respectivamente con un rendimiento máximo de hidrógeno de 186 ml/g-almidón.

-El biogás producido contiene el 99% de hidrógeno después de pasar a través de una solución de hidróxido de potasio (KOH) para remover el CO_2 .

En un proceso de tratamiento de aguas residuales anaeróbico tradicional, la demanda química de oxígeno (DQO) se redujo principalmente a través de la conversión de productos intermedios (por ejemplo, ácido acético) a metano por medio de microbios metanogénicos. Durante este proceso de producción de hidrógeno, la DQO se redujo a través de la liberación de gas. Por lo general, la eliminación de DQO es inferior al 20% durante el proceso de producción de hidrógeno. En este estudio con una solución de 4864 mg / L, la eficiencia de eliminación de DQO alcanzó el 64%, más alto que el valor informado anteriormente de $24.3 \pm 9.1\%$. Se obtuvo una eliminación de DQO mucho mayor del 82% en un estudio previo, en el cual se mantuvo un pH de 7.0 un proceso anaeróbico de dos etapas separado por fases y empleando tanto hidrógeno como metano fueron producidos.

Por otra parte en [6] describe como el CO_2 forma parte de los gases invernadero que producen daños al planeta y al ambiente principalmente, el cual es principalmente emitido por la combustión de combustibles fósiles. La absorción por membrana es un nuevo método de captura que combina las ventajas de la absorción química y la separación por membrana. En este estudio se propone un modelo simétrico en 2D para un proceso de absorción membrana- CO_2 -Piperazina (PZ). La solución PZ mostró alto desempeño en la captura de CO_2 debido a la alta tasa de reacción química constante. Decreciendo el caudal de gas e incrementando la absorción de CO_2 . Por otro lado, variando las propiedades podría también afectar la captura de CO_2 . Velocidad del gas 0.28 m/s, velocidad de

absorción 0.08 m/s, 20% de CO₂ en mezcla de gases, y 0.94 mol/L de PZ fue recomendado como las condiciones óptimas después del estudio. Este modelo numérico es viable para el uso potencial en los sistemas de absorción CO₂-Absorbente-Membrana.

En este trabajo [7] se presenta el modelado y una simulación numérica para la remoción de CO₂ de la mezcla de gases CO₂ /CH₄ utilizando hidróxido de sodio (NaOH), monoetanolamina (MEA) y trietanolamina (TEA) líquidos absorbentes dentro del contactor de membrana de fibra hueca. Un arreglo contra-corriente de agentes absorbentes y la mezcla gaseosa de CO₂ /CH₄ son implementados en el modelado y simulación numérica. Los modos de operación no-húmedo y parcialmente húmedo son considerados donde en el modo parcialmente húmedo, la mezcla gaseosa CO₂ /CH₄ y los líquidos absorbentes llenan los poros de la membrana. El removedor deteriorado de CO₂ en el modo de operación parcialmente húmedo es principalmente debido a la resistencia a la transferencia de masa impuesta por el líquido en los poros de la membrana. La validación de la simulación numérica es hecha basada en la comparación de los resultados simulados del removedor de CO₂ usando NaOH y datos experimentales sobre el modo de operación no-húmedo. La comparación ilustra un deseable acuerdo con una desviación promedio del menos del 5%. Acorde a los resultados, el MEA provee una eficiencia más alta al remover el CO₂ en comparación con otros líquidos absorbentes.

El orden de operación del removedor de CO₂ es MEA>NaOH>TEA. La influencia de los modos de operación no-húmedo y parcialmente-húmedo en el removedor de CO₂ son evaluados en este artículo como una de las novedades. Además, el porcentaje de la captura de CO₂ como una función de velocidad del gas para diversos porcentajes de humectación de los poros de la membrana que varía de 0% (modo de operación no-húmedo) a 100% (modo de operación completamente húmedo) es estudiado en esta investigación, la cual puede ser propuesta como la otra novedad. Los resultados indican que incrementan en algunos parámetros operacionales tales como módulo de longitud, porosidad de la membrana y concentración de absorbentes que mejoran el porcentaje de remoción del CO₂ de la mezcla gaseosa CO₂ / CH₄ mientras que incrementa la tortuosidad de la membrana, la velocidad del gas y la concentración inicial de CO₂ tiene una influencia desfavorable en la separación eficiente de CO₂.

Recientemente, un nuevo modelo para la transferencia de masa reactiva durante la absorción de CO₂ en un medio acuoso de hidróxido de sodio (NaOH) [8] fue desarrollado, basado en el uso de una expresión bastante aplicable para el factor de mejora y tomando en cuenta la reacción de CO₂ con agua además de eso con iones de hidrógeno el cual cita [Krauß and Rzehak, Chemical

Engineering Science 166 (2017) 193–209]. Sustituyendo la área inter-facial de concentración estimada de datos experimentales, se encontró una buena concordancia para la medición puntual del valor de pH dependiente del tiempo en una columna de burbujas de acuerdo a este trabajo citado el cual toma de la literatura [Darmana et al., Chemical Engineering Science 62 (2007), 2556–2575]. En esta contribución, este modelo de transferencia de masa es implementado en un marco Euler-euler RANS incluyendo la parte hidrodinámica del problema. Los cierres hidrodinámicos fueron tomados de la misma manera como aplicadas exitosamente para el rango de diferentes condiciones en previos trabajos. Sin embargo, la exactitud del modelo acoplado en la predicción del valor de pH se ve detrás de la simple aproximación puntual.

En un estudio pionero [9], se consideró la absorción reactiva de CO_2 en agua con NaOH en una columna de burbujas. Aunque los resultados obtenidos fueron bastante buenos entre una simulación Euler-Lagrange y medidos los valores de pH en un punto simple. Esto es visto en este proyecto usando un tratamiento simplificado en el lugar de medición. Particularmente relevante es el factor de mejoramiento, el cual describe el efecto de la reacción química en la transferencia de masa. Se ofrece una investigación de expresiones alternativas para estas cantidades, basada en que un mejor resultado puede ser obtenido con los datos. Además que se puede considerar una red completa de posibles reacciones.

En otro trabajo [10] se propone el uso de microporos MOF's (Metal-organic frameworks) en donde se describe el uso prometedor de estos para la captura y separación CO_2 a través del diseño de MOF's altamente porosos que absorban CO_2 a alta presión, siendo alta la factibilidad de obtención de MOF's, a diferencia de otros métodos actuales que utilizan solvente acuosos para la absorción. Aquí se utiliza una estructura organometálica (UTSA-16) la cual ha demostrado una alta absorción de CO_2 en condiciones ambientales, esto lo hace un material útil para capturar CO_2 en etapa final de la combustión de la corriente de biogás, esto confirmado por medios de experimentos simulados. La capacidad de almacenamiento y la selectividad del UTSA-16 material que se utiliza para la captura de dióxido de carbono se le atribuyen a los poros y a los lugares de unión al dióxido de carbono, que han sido demostrados por estudios realizados.

1.7.2 Limpieza de Biogás

Existen otros trabajos en donde proponen métodos para la limpieza o acondicionamiento del biogás para su utilización como combustible o en la generación de electricidad, estos trabajos exponen métodos para eliminar o separar componentes tales como el metano, sulfuro de hidrógeno, vapor de agua, dióxido de carbono, hidrocarburos, etc. De los cuales se consideran los métodos de absorción de dióxido de carbono.

En [11] se realiza una revisión general de los métodos de absorción de CO_2 y que fueron de gran utilidad para este proyecto el conocer y comprender estos métodos para determinar el más apropiado y factible, dichos métodos tienen una clasificación de acuerdo al medio que se utiliza:

Absorción por medios físicos:

Estos métodos que su principal función es la absorción llamados fisicoquímicos son utilizados normalmente en la limpieza del biogás siendo efectivos inclusive a caudales bajos, es menos complicado, utiliza poca infraestructura y de bajo costo. En este trabajo se expone el uso de un método fácil y económico en el cual se utiliza agua presurizada como absorbente. El biogás sometido a alta presión y suministrado desde el fondo a una columna de lecho empacada, el agua presurizada rociada desde la cima de la columna. Este proceso de absorción debe realizarse a contra-corriente, así se consigue la disolución de dos componentes el CO_2 y el H_2S en agua saliendo por el fondo de la torre, mientras que el agua puede recircularse a una torre de purificación.

Absorción por medios químicos:

Este método de acuerdo a la investigación requiere de la formación de enlaces químicos entre el soluto y el solvente. Posteriormente para la regeneración del solvente, involucra la ruptura de esos enlaces y la aportación de energía, dichos solventes químicos utilizan soluciones acuosas de aminas (ej. mono-, di- o tri-ethanolamine) o soluciones acuosas de sales alcalinas (ej. hidróxido de sodio, potasio y calcio).

Adsorción por medio de superficie sólida:

Este proceso de absorción implica transferir el soluto en la corriente de gas a una superficie de un material sólido, el cual es concentrado a través de las fuerzas físicas de Van der Waals. Los adsorbentes que se comercializan actualmente son sólidos granulares los cuales poseen una amplia superficie en relación con su volumen. Después de un profundo análisis de las posibles materiales que se utilizaran, con este proceso se pueden separar componentes del biogás como CO_2 , H_2S , humedad entre otras impurezas. También explican el proceso de purificación del biogás mediante el uso de alguna forma de silicio, alúmina, carbón activado o silicatos, los cuales son conocidos como tamices moleculares. Esta absorción se realiza generalmente a alta temperatura y presión. Resaltando las características como buena capacidad para absorber humedad, diseño sencillo y operación simple. Sin olvidar que es un proceso costoso, con altas caídas de presión y altos requerimientos de calor lo cual se debe considerar en el momento de su utilización o planeación.

Separación por medio de membrana:

Este proceso trabaja bajo el principio de que algunos componentes de biogás pueden pasar a través del orificio de una membrana delgada (menor a 1 mm, Betzabet Morero) mientras que otros componentes del gas no pasan a través de dichos orificios. Gracias a la diferencia de presión en la membrana es que se lleva acabo el transporte de cada componente y dependiendo también de la permeabilidad del componente en el material de la membrana. Por ejemplo para la limpieza del metano se debe contar con una permeabilidad alta. Explica porque una sola fase de absorción de este tipo no puede separar completamente dióxido de carbono y metano a baja presión en la salida ya que el CO_2 contiene un 12% v/v de metano.

El gas también contiene aproximadamente 88% v/v de metano, no obstante, en los procesos de separación multietapas se puede alcanzar el 98% v/v aunque se requiere alcanzar también una alta presión (4 MPa).

En este trabajo también el uso de una membrana sólida construida a partir de polímeros de celulosa-acetato la cual posee una permeabilidad al CO_2 y al H_2S de 20 y 60 veces respectivamente, estas siendo superiores al CH_4 , pero limitando la utilización de este proceso las altas presión que se requieren las cuales rodean los 25 a 40 bar.

Separación por medios criogénicos:

Este método criogénico para la separación de la mezcla de gas por medio de condensaciones fraccionadas y destilaciones a bajas temperaturas, siendo el biogás crudo es comprimido a 80 bar requiriendo de varias etapas para su compresión. Una vez se ha comprimido el gas se seca y así evitar que se congele durante el proceso de enfriado (Mediante intercambiadores) y el CO₂ condensado son enviados a un separador. Aunado a esto el CO₂ se procesa para recuperar el metano disuelto en él, y se recicla a la entrada del gas. Obteniendo con este proceso metano con un 97% de pureza.

Separación por medio de la conversión química:

Cuando se requiere un alto grado de purificación del biogás estos métodos son muy útiles y es por esto que son muy empleados, porque reduce las concentraciones de los gases indeseables a niveles muy bajos, este método realiza la parte final del proceso de limpieza de biogás siendo un método que complementa a otro método para la purificación.

Uno de estos procesos con los que puede ser combinado es metanización, en el que el CO₂ y el H₂ reaccionan en productos como metano y agua y es por esto que este método resulta su costo muy elevado.

En este trabajo [12] por ejemplo se exponen el problema que se enfrenta actualmente en la búsqueda de procesos en la obtención de biogás como fuente alterna, sin embargo también el problema es la limpieza del biogás de los componentes como dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno entre otros de los cuales se vieron anteriormente. Por lo cual proponen el uso de un conjunto de microalgas-bacterias para la limpieza del biogás ofreciendo una solución de bajo costo, implementado con un fotobiorreactor para el crecimiento de las microalgas con una columna de absorción, en donde el CO₂ es eliminado por las algas, produciendo O₂ el cual será utilizado por las bacterias para oxidar el H₂S.

Los nutrientes que utiliza son proporcionados por agua residual la cual es tratada simultáneamente con el proceso de absorción, finalmente muestran un informe el cual contiene los resultados del estudio en el laboratorio, y un diseño de la planta de purificación de 1200 m³/d biogás conectada a una planta de tratamiento de aguas residuales real.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede determinar la viabilidad de la planta diseñada para su implementación a escala real, cumpliendo con dos objetivos una la purificación del biogás y por otra parte el tratamiento de aguas residuales. El gas obtenido puede ser utilizado para obtener energía esto gracias al proceso de absorción de dióxido de carbono por medio del uso de microalgas.

1.8 Conclusión del capítulo

Gracias a este capítulo es que se obtuvo una clara comprensión del problema ya que al estudiar el funcionamiento de la celda de combustible se entendió porque no se le debe suministrar dióxido de carbono, a partir de esto se da la justificación del porqué de este trabajo y se planteó la hipótesis, se formularon los objetivos que se deben cumplir para solucionar el problema y finalmente en el estado del arte es que se revisaron las técnicas y trabajos que se han desarrollado en cuanto a limpieza de biogás y captura de dióxido de carbono lo que fue de gran utilidad para encontrar una solución al problema y que más adelante se detalla su implementación.

CAPÍTULO II. Marco teórico

2.1 Conceptos generales

En este capítulo se describen los principios de funcionamiento de los sensores utilizados en el proyecto, en la forma en cómo se implementan y por qué se utilizan para este proyecto, por lo que se parte del concepto de transductor el cual es un dispositivo que cambia una señal física en otra señal de forma física distinta, es decir, transforma un tipo de energía en otra, señales como mecánica, térmica, magnéticas, químicas, eléctricas, ópticas. Para esta área de estudio se consideran transductores a aquellos dispositivos que convierten una señal física como mecánica, química, óptica, etc. en una señal de salida eléctrica.

Se considera un transductor de entrada y el transductor de salida, el primero llamado sensor y el segundo actuador, el sensor recibe información mientras el actuador la procesa.

Por lo tanto un sensor es un dispositivo que mide la energía del medio en el que se encuentra y produce una señal transducible.

Los sensores pueden clasificarse de acuerdo a la energía aportada como moduladores y generadores, los moduladores requieren una fuente externa y dependiendo la entrada es como regula la energía se salida, por otro lado los generadores no requieren de una fuente externa de acuerdo a la variable de medida produce una tensión.

De acuerdo a la señal de salida pueden ser analógicos o digitales, en los analógicos su información se encuentra en la amplitud de la señal producida, también los sensores del dominio temporal y en algunos en el dominio de la frecuencia. Los digitales su información se encuentra en el dominio de tiempo discreto (pasos o saltos, flancos).

Por la forma de funcionamiento se clasifican en sensores de deflexión o sensores de comparación, de deflexión la variable medida produce un efecto similar pero opuesto en las propiedades del instrumento, el cual producirá una variable de interés, en los de comparación se aplica un efecto

conocido opuesto al generado por la variable a medir en el cual un detector de desequilibrio es requerido y un medio para restablecerlo.

En electrónica es más conveniente la clasificación de acuerdo al parámetro variable:

- Resistencia
- Capacidad
- Inductancia
- Generadores de tensión carga o corriente
- Otros

Para el desarrollo de esta tesis se emplea el uso de sensores resistivo, capacitivo, y de gas. A continuación se dará una breve explicación de sus principios de funcionamiento y sus principales características

2.2 Sensores resistivos

Debido a que son muchas las magnitudes físicas que afectan la resistencia de un material ha dado como resultado que sea la técnica más utilizada para el diseño de sensores.

Las fotorresistencias utilizan la variación de resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir radiación óptica, es decir, radiación electromagnética siempre que tenga longitudes de onda entre 1mm y 10nm y también dependerá del material con el que haya sido fabricado. El LDR (Light Dependent Resistor por sus siglas en inglés) es una resistencia que varía su valor en relación con la luz incidida en su superficie inversamente proporcional, es decir a mayor cantidad de luz incidida es menor su resistencia y de manera inversa si es mínima la luz incida en su superficie mayor será su resistencia.

Cuando no existe radiación lumínica que incida en el LDR los electrones se unen aumentando su resistencia, una vez que la luz toque la superficie despide electrones haciendo al material conductor debido a que su resistencia disminuye. El fotoreistor solamente varia su resistencia con la radiación limínica que tenga las longitudes de onda antes mencionada, pero por ejemplo un LDR construido con sulfuro de cadmio es sensible a las longitudes de onda de la luz visible en cambio los LDR

fabricados de plomo son sensibles a las radiaciones infrarrojas únicamente, por lo cual ambas fotoresistencias son muy útiles para distintas aplicaciones.

Por esta razón surge la clasificación por el material de fabricación y por su linealidad, por lo tanto, por su fabricación existen fotoresistores son de sulfuro (talio, cadmio, plomo) y de seleniuro de cadmio. Por otra parte los conocidos fotodiodos cuando se polarizan a la inversa tienen un comportamiento lineal y las fotoresistencias no lineales que son las más usadas y cuya polarización no influye en su función.

2.2.1 Sensores de gas

Los sensores de gas se utilizan para detectar presencia de gas y algunos casos más precisos también las concentraciones del gas, algunas de acuerdo a la calibración de la resistencia pueden detectar diferentes tipos, mientras que otros son para algún tipo de gas en específico.

2.2.2 Funcionamiento de sensores de gas

Estos sensores son transductores entre una resistencia de un material de óxido semiconductor y una reacción química de un gas en específico variando así la resistividad del material en donde se lleva a cabo la reacción, la que ocurra la detección se requiere de un material semiconductor y de acuerdo a como se comporta la película de óxido semiconductor en la reacción por el gas en contacto se liberan o se ganan electrones. Por lo que siempre se requiere de tres elementos como lo es un circuito de acondicionamiento, la película sensora y un microcalefactor.

Cuando el gas transita a través del microcalefactor la reacción con el gas se acelera cambiando la resistencia del material de óxido semiconductor por lo que el circuito percibe la variación como la presencia de gas. En sensores de gas más comerciales como microcalefactor utilizan dos bobinas cubiertas por alúminas y revestidas por paladio o rodio las cuales también son llamadas pellistores, mientras que en los sensores de sistemas micro-electromecánicos -MEMS por sus siglas en inglés- utilizan como microcalefactor utilizan materiales de poli-silicio encima de sustrato de silicio monocristalino. Para la elaboración de óxido semiconductor los materiales utilizados son ZnO y el SnO₂.

2.3 Sensores Capacitivos

2.3.1 Reactancia

La reactancia es la resistencia al paso de corriente alterna que presentan los inductores y condensadores y junto con la resistencia forman la impedancia total, su unidad es el ohmio y su símbolo Ω . Siendo la resistencia la parte real de la impedancia y la reactancia la parte compleja.

$$Z = R + Xj$$

2.3.2 Tipos de reactancia

Cuando circula corriente alterna por un elemento que posee reactancia la energía es almacenada y se libera en forma de campo magnético en las bobinas y en forma de campo eléctrico en los condensadores, produciendo un desfase en las ondas de tensión y corriente, reactancia capacitiva e inductiva se representa por jX_L y $-jX_C$ en eje complejo de tal forma que la reactancia total es la suma vectorial de la reactancia capacitiva e inductiva:

$$X = (jX_L - jX_C)$$

De aquí que $X > 0$ la reactancia es inductiva ($X_L > X_C$)

$X = 0$ no existe reactancia y la impedancia es resistiva ($X_L = X_C$)

$X < 0$ la reactancia es capacitiva ($X_L < X_C$)

2.3.3 Condensador Variable

Un condensador eléctrico siempre cuenta con dos materiales conductores teniendo entre ellos un material dieléctrico pudiendo ser un sólido, líquido, gaseoso o inclusive vacío, existe una relación entre la carga Q y la diferencia de potencial V , la capacidad es directamente proporcional a la carga Q e inversamente proporcional a la diferencia de potencial: $C = Q/V$, dependiendo de la geometría del conductor y de la geometría del material dieléctrico entre los conductores $C = C(\epsilon, G)$. Por ejemplo para un condensador de n placas paralelas:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} (n - 1)$$

n - número de placas paralelas iguales

A - área

D - distancia entre cada par

ε_r - constante dieléctrica relativa del material

ε_0 - constante dieléctrica del vacío

De esta manera cualquier fenómeno o magnitud que produzca cambio en cualquiera de estos valores provocará un cambio en el valor de la capacidad C y por lo tanto estos fenómenos o magnitudes podrán ser detectados por este dispositivo principalmente que cambien los valores del dieléctrico o la geometría.

Por ejemplo como indicador de nivel basta con remplazar la permitividad relativa ε_r del aire que es de prácticamente de 1 por la del agua que varía de 88 a 0 °C y de 55.33 a 100 °C la sustitución del dieléctrico producirá un cambio apreciable en la capacidad lo que se puede aprovechar también para medir la humedad disponiendo de un dieléctrico que absorba y libere agua sin histéresis.

2.3.4 Sensores capacitivos de proximidad

Los sensores capacitivos son similares a los inductivos la diferencia es que en lugar de producir un campo magnético producen un campo eléctrico los cuales detectan objetos metálicos y no metálicos dependiendo de la constante dieléctrica de cada uno.

Los usos más comunes de los sensores capacitivos son por ejemplo la detección de desplazamiento rectilíneo o angulares, medición de presión, fuerza aceleración e incluso deformaciones y los sensores de proximidad teniendo un mayor alcance a los detectores inductivos con un amplio número de materiales a detectar ya que no solo detectan materiales metálicos, sino también materiales dieléctricos como plástico, madera, papel o vidrio detectándolos inclusive a través de cajas de cartón o paredes en los sensores más potentes. En general los sensores de proximidad cuentan con tres parte principales que son la placa dieléctrica un oscilador y un trigger, además que algunos cuentan con un potenciómetro para su calibración.

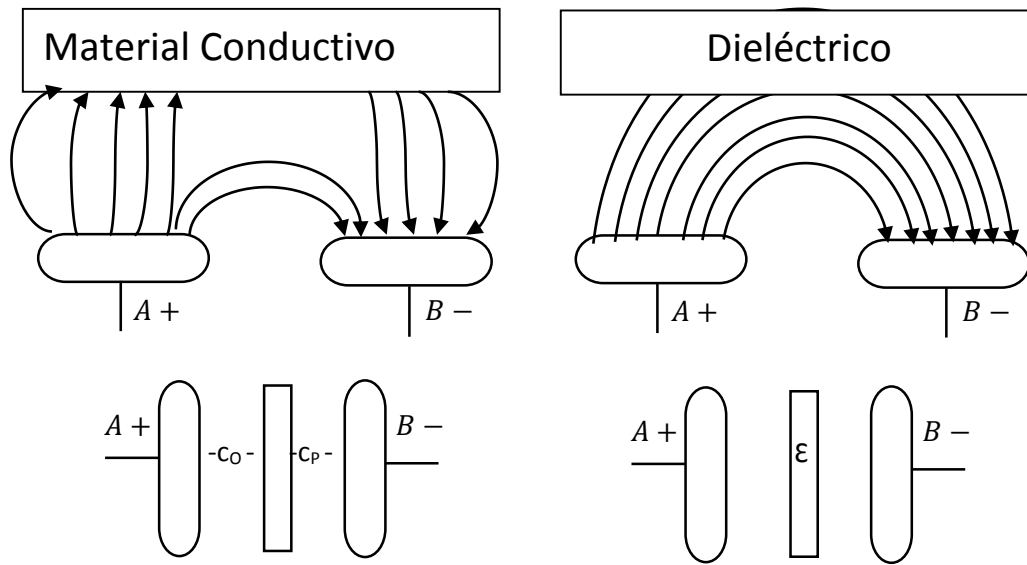


Figura 3 Funcionamiento sensor capacitivo

2.4 Potencial de hidrógeno (PH)

La medida de acidez o basicidad de una sustancia depende del potencial de hidrógeno, es decir, de la concentración de iones de H^+ y OH^- en una solución acuosa, y debido a que estas concentraciones son muy pequeñas Soren Sorensen propuso en 1909 una medida práctica a la que denomino pH. El pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones de H^+ en mol/L.

$$pH = -\log(H^+)$$

Siendo negativo el logaritmo para dar un pH positivo de lo contrario debido a la pequeña cantidad de iones de H^+ el logaritmo resultaría negativo y por consiguiente el pH, el pH es adimensional y para determinar si una solución es acida o básica de acuerdo a la concentración de iones de H^+ se clasifican así:

Disoluciones ácidas	H^+	Si es mayor a $1.0 \times 10^{-7} M$	$pH < 7$
Disoluciones básicas	H^+	Si es menor a $1.0 \times 10^{-7} M$	$pH > 7$

Disoluciones neutras	H ⁺	Si es igual a 1.0 x 10 ⁻⁷ M	pH = 7
-----------------------------	----------------	---	--------

Tabla 2 Descripción del pH

2.4.1 El mol

Un mol de acuerdo al Sistema Internacional de medidas es la cantidad de una sustancia que contiene las entidades elementales como son átomos, moléculas u otras partículas con respecto de la cantidad de átomos exacta en 12gr del isótopo de carbono-12. Dicha cantidad de átomos se determina por medio del número de Avogadro el cual se obtiene experimentalmente, fue nombrado así en honor al científico Amedeo Avogadro, el valor de dicho número es $6,0221415 \times (10^{23})$. Por ejemplo un 1 mol de átomos de hidrógeno contiene $6,022 \times (10^{23})$ átomos de H.

2.4.2 Molaridad

La molaridad o concentración molar (M) es la cantidad de moles en una sustancia por cada litro en una solución.

2.5 Medición de pH

Para medir el pH de una disolución podemos emplear distintos métodos, dependerá de la precisión que se requiere el método a elegir. Existen unas sustancias llamadas indicadores para mediciones sin exactitud, las cuales varían su color en función del pH de la solución en las que sean disueltas como es el uso de papel o soluciones que colorean la disolución a medir de acuerdo al potencial de hidrógeno, y las mediciones más exactas las cuales utilizan principio eléctricos de acuerdo a los materiales utilizados para efectuar la medición de pH utilizando disolución de referencia para la comparación o calibración del mismo dispositivo.

2.5.1 Indicadores

Estos indicadores suelen dar una noción sobre el pH en el que se encuentra la disolución, ya que no dan un valor de pH completo puesto que solo reaccionan a un valor de pH en específico ya sea bajo, alto o los dos valores en el mismo indicador, por ejemplo existe una variedad de tipos de papel indicador los cuales ofrecen una lectura de hasta 0.2 unidades de pH los cuales cambia el color del papel de acuerdo a si se trata de una solución ácida o base como por ejemplo el papel tornasol, teniendo en cuenta que la medición con papel puede ser afectada por la presencia de sales, proteínas u otra sustancia orgánica, por otra parte existen solución llamadas de titulación las cuales reacomodan sus enlaces internos cada vez que existe una pérdida o ganancia de iones de hidrogeno y a diferencia del papel (que es el que cambia de color) estas colorean la solución de un color específico para cada tipo de indicador y a pesar de que no se consideran exactos si ofrecen un rango más específico de valores de pH, nombrando por ejemplo la fenolftaleína la cual ofrece un rango de 8.2 a 10 por lo que en valore mayor de ph 10 colorea la solución de color magenta o rosa y en el valor de 8.2 la solución vuelve a su estado original o incoloro, otro ejemplo es el azul de bromotimol el cual en soluciones ácidas vira la solución al color amarillo (inferior al 6.6 de pH), en pH neutro presenta un color verde (pH 7) y en soluciones con pH básico vira al color azul (superior al 7.6 de pH) teniendo un rango más amplio de reacción, también se puede encontrar el naranja de metilo que tiene un rango de 3.1 a 4.4 de pH el cual vira al color naranja en soluciones ácidas y al amarillo en soluciones básicas.

2.5.2 El pH-metro

Este método consiste en sumergir dos electrodos contenidos en el pH-metro dentro de la solución a medir el pH, por medio de la medición de voltaje ya que el voltaje de uno de los electrodo es dependiente del pH de la solución siendo el más utilizado el fabricado de vidrio de borosilicato debido a que es permeable a los iones de hidrógeno y no para los cationes o aniones distintos, por ejemplo si se introduce una lámina delgada de vidrio de borosilicato entre dos soluciones con diferente concentraciones de iones de hidrógeno, estos iones se trasladan de la solución de mayor cantidad de iones a la de menor cantidad, esto sucede gracias a que cada vez que un ion de hidrógeno pasa a través de la lámina de vidrio esta añade un ion positivo a la solución con menor

cantidad de iones de hidrógeno y dejando un ion negativo a la solución de mayor cantidad produciendo entonces una diferencia de potencial en el vidrio. La conexión al dispositivo medidor de voltaje se efectúa a través de un hilo de plata y si la concentración fija de iones de hidrógeno en una de las soluciones la diferencia de potencial es entonces proporcional al pH de la otra solución, siendo por esta razón que se utiliza una disolución de referencia con un pH ya conocido.

2.5.3 Sonda pH

Su funcionamiento es parecido al pH-metro en cuanto que utiliza una diferencia de potencial conforme se ganan o liberan iones de hidrógeno, a diferencia que este no utiliza una solución para comparar, más bien se requiere de una solución de determinado pH para la calibración de sensor de pH a los que se les llama buffers y estos tienen un pH definido, se recomienda utilizar para su calibración un buffer neutro inicialmente, cuando se calibra en el neutro se procede con un buffer de pH ácido o básico dependiendo de la disolución a la que se le vaya a realizar la medición.

La lectura se realiza a través de una tarjeta de un circuito con conector BNC la cual puede ser conectada a un microcontrolador o a un microprocesador para su lectura, se alimenta con 5v y debido a que cuenta con la parte que realiza la medición de cristal se recomienda utilizar agua destilada para su limpieza y almacenamiento ya que si se deja secar por un tiempo prolongado puede dañarse y dar lecturas erróneas al igual que si se utiliza con una solución básica por varias horas. Tiene la ventaja de que puede medir también la temperatura de la solución la que la hace útil para proyecto en donde se conozca que la temperatura afecta el valor de pH.

2.6 Hidróxido de sodio (NaOH)

El hidróxido de sodio (NaOH, hidrato de sodio o hidróxido sódico), mayormente conocido como sosa cáustica, forma parte de la familia de los hidróxidos ya que los iones sólidos que lo forman son iones hidróxido e iones metálico haciendo al hidróxido de sodio una base fuerte y altamente soluble en agua aunque con una cantidad considerable de liberación de calor, además de ser higroscópico. Gracias a la presencia de iones de OH⁻ el hidróxido de sodio es una solución alcalina, es obtenido como un producto secundario en la fabricación del cloro por electrolisis para disoluciones acuosas de cloruro de sodio. Las principales propiedades físicas del hidróxido de sodio son: el color blanco, sólida, su densidad es de 2.13 gr/mL y su punto de fusión es de 323 °C.

El hidróxido de sodio absorbe con gran facilidad el dióxido de carbono y la humedad del ambiente además de ser utilizado en la fabricación de productos de limpieza.

2.8 Fotodiodo

El fotodiodo es un sensor de luz o fotodetector, sus aplicaciones se pueden encontrar en mando remotos, sensores de movimiento, cuando se implementa junto a un transistor da como resultado un fototransistor e integrándolo con un diodo emisor de luz se obtiene un optoacoplador. Básicamente el fotodiodo es un diodo pensado para la detección de luz, aumentando su corriente inversa en presencia de esta.

Por ser un semiconductor posee un terminal positiva llamada ánodo la cual es de material P y una terminal negativa llamada cátodo de material N y a diferencia del diodo emisor de luz el cual tiene una estructura externa que favorece la salida de la luz la estructura del fotodiodo facilita la entrada de la luz.

De esta manera el fotodiodo otorga una corriente eléctrica proporcional a la luz recibida, es decir cuanto mayor sea la luz incidida en el material PN mayor será la corriente inversa entregada, ya que al recibir luz el material se calienta rompiendo los enlaces covalentes produciendo portadores produciendo la corriente inversa.

La magnitud que utiliza para la iluminación es mW/cm^2 la cual en la hoja de datos aparece como potencia luminosa o densidad luminosa, además se considera la longitud de onda de la luz para determinado color y para el tipo de radiación luminosa para su aplicación en diferentes proyectos según las necesidades.

Por ejemplo se puede encontrar en el mercado el fotodiodo muy popular es el BPW43 el cual posee una apariencia parecida a un LED común, este fotodiodo entrega una tensión de 0.7 V cuando se conecta con polarización directa, si no se le aplica ninguna polarización produce una tensión de 0.5 voltios al incidir luz en el material PN, a dicha tensión se le llama potencial fotovoltaico comportándose el fotodiodo como celda fotovoltaica.

2.9 Sensor de color arduino

El sensor de color TCS3200 convierte la luz a frecuencia el cual combina fotodiodos de silicio (estos fotodiodos son configurables para el color deseado) y un convertidor de corriente a frecuencia en un solo circuito integrado CMOS como se muestra en la figura 4 teniendo como resultado a la salida una onda cuadrada, en la figura 5 se muestra el diagrama de las conexiones metálicas con los pines digitales.

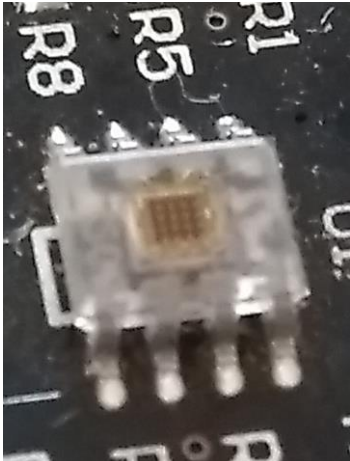


Figura 4 Integrado CMOS

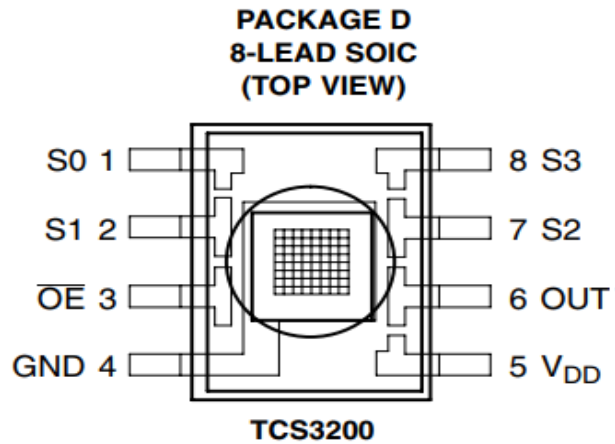


Figura 5 Pines del TCS3200 – Texas Advanced Optoelectronic Solutions [13]

El sensor puede ser configurado a distintas frecuencias de trabajo como se verá más adelante, a través de dos pines digitales de control de entrada, la frecuencia de trabajo en la que la frecuencia directamente proporcional a la intensidad de la luz es con un ciclo de trabajo del 50% gracias al convertidor de frecuencia como se muestra en la figura 6.

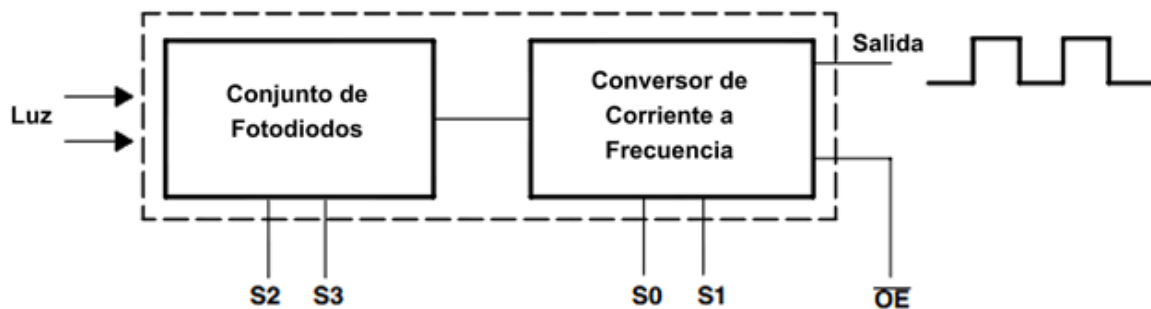


Figura 6 Diagrama sensor de color - Texas Advanced Optoelectronic Solutions [13]

El sensor TCS3200 puede ser utilizado de forma directa con un microcontrolador por medio de las entradas y salidas u otro circuito lógico. Para tener múltiples unidades de una línea de entrada en el microcontrolador se debe tener alta impedancia la cual se logra configurando el pin digital de salida OE en estado alto lo cual enciende o apaga el sensor. Por otra parte si se desea encender el sensor programando los pines digitales S2, S3 para determinado color entonces se requiere un estado de baja impedancia por lo que la salida digital OE debe conectarse a tierra de la alimentación del sensor.

En el chip del sensor puede observarse en la figura 7 una cuadrícula de 8×8 con cuatro distintos colores, cada cuadro es un fotodiodo por lo que se cuenta con 64 fotodiodos en total y el color de cada fotodiodo determina el color que detecta cada uno, de esta forma se cuenta con 16 fotodiodos que detectan el color verde, 16 fotodiodos que detectan el color azul, 16 fotodiodos que detectan el color rojo y 16 fotodiodos sin filtro los cuales pueden apreciarse de color blanco. Los fotodiodos están conectados en paralelo de acuerdo al mismo color, de tal forma que sea más uniforme la lectura por la incidencia de la luz.



Figura 7 Matriz de fotodiodos y sensor de color

El módulo que se utiliza esta montado junto con cuatro LED's blancos para la iluminación de los objetos de los cuales su color será detectado y los ocho pines de conexión, la distancia aconsejable para una correcta medición es de 1 cm.

El sensor puede alimentarse en el rango entre 2.7 a 5.5 voltios a través del pin VCC alimentando también los led's y posteriormente se describen la función de cada pin digital del sensor:

- S0, S1: Ajuste de frecuencia en la salida.
- S2, S3: Selección del filtro de cada color.
- VDD: Voltaje de alimentación (de 2.7V a 5.5V).
- GND: Negativo.
- OUT: Salida en frecuencia.
- OE: Salida de frecuencia (activo bajo).

Para poder seleccionar el color que se desea detectar por los fotodiodos se deben configurar los pines de control S2 y S3. Como ya se mencionó anteriormente los fotodiodos del mismo color están conectados en paralelo y cada grupo del mismo color los cuales no se encienden al mismo tiempo de los demás grupo de colores, las combinaciones de estados altos y bajos para detección de distinto color se muestran en la figura 8.

De este modo también se puede escalar la frecuencia de trabajo variando los estados de los pines S0 y S1 de acuerdo a la combinación mostrada en la figura 9 ya que si se desea trabajar con un microcontrolador arduino se recomienda fijar una frecuencia de trabajo del 20%, entonces se configuran los pines S0 en ALTO y el pin S1 en BAJO.

S2	S3	Tipo de fotodiodo
L	L	Rojo
L	H	Azul
H	L	Sin filtro
H	H	Verde

Figura 8 Calibraciones de color

S0	S1	Escala de frecuencia de salida (fo)
L	L	Apagado
L	H	2%
H	L	20%
H	H	100%

Figura 9 Calibración ciclo de trabajo

2.10 Conclusión del capítulo

De este capítulo se concluye que se obtuvieron los conocimientos necesarios para comprender el funcionamiento de los sensores y que gracias a esto es que se pudo determinar que sensores pueden utilizarse en la solución del problema de acuerdo a los objetivos planteados, también se comprendió que es el pH y las formas de medirlo, se revisó información sobre el hidróxido de sodio para poder utilizarlo en la solución del problema.

CAPÍTULO III. Diseño e implementación

3.1 RESUMEN CAPÍTULO

El objetivo de esta tesis es la captura de dióxido de carbono (CO_2) contenido en el biohidrógeno ($\text{H}_2 + \text{CO}_2$) principalmente, aunque también puede ser utilizado con biogás ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$). Entre los diferentes métodos de captura o filtrado de CO_2 vistos en el capítulo II se determinó el que utiliza hidróxido de sodio (NaOH) es el más adecuado debido a que el grado de absorción es elevado en comparación con los demás descritos y su costo es relativamente bajo.

Una forma de saber cómo el hidróxido de sodio va perdiendo capacidad de absorción es midiendo su pH, esto debido a que el NaOH tiene un pH de 13 y conforme absorbe CO_2 su pH baja a un valor de 7 dando como productos de la reacción agua (pH 7) y bicarbonato de sodio.

Como se vio en el capítulo 2 existen diferentes medidores de pH de los cuales se proponen el uso de dos de ellos, la sonda de pH e indicadores de pH por medio de cambio de coloración de la solución, se proponen dos diseños de depósitos con diferentes geometrías (cilindro y ortoedro), con el primer depósito cilíndrico se utiliza la sonda de pH y se realizan pruebas, de la misma forma con los indicadores.

En el diseño también se considera el uso y montaje de sensores capacitivos para indicar el nivel de solución, esto para indicar que no halla fuga de líquidos, y un sensor MQ8 en caso de una fuga de gas.

De acuerdo a la literatura se determinó la cantidad necesaria para una absorción aceptable de CO_2 la cual es de dos recipientes con un volumen de dos litros cada uno los cuales estarán conectados en serie, para conocer el momento en que el NaOH está perdiendo capacidad de absorción de CO_2 se agregan 5 ml de fenolftaleína la cual vira del color transparente al rosa en un pH de 8 a 12, cuando se satura de CO_2 vuelve al transparente indicando así que ya no está absorbiendo CO_2 en la manera deseada.

El cambio de color se monitorea a través de un sensor de color TCS3200 y debido a que las mediciones contienen ruido blanco se aplica el filtro de kalman en matlab para obtener la curva del color y así estimar la absorción de CO_2 .

Se utiliza una tarjeta Arduino para la lectura de los sensores utilizando la comunicación serial con una interface labview para visualizar y operar los sensores activando una electroválvula para detener la entrada de biohidrógeno y así evitar concentraciones de CO_2 que dañen la celda de combustible.

Se propone utilizar dos geometrías diferentes de depósitos (cilindros y ortoedros) para el hidróxido de sodio para la medición de color y determinar cuál es el más apto para este propósito.

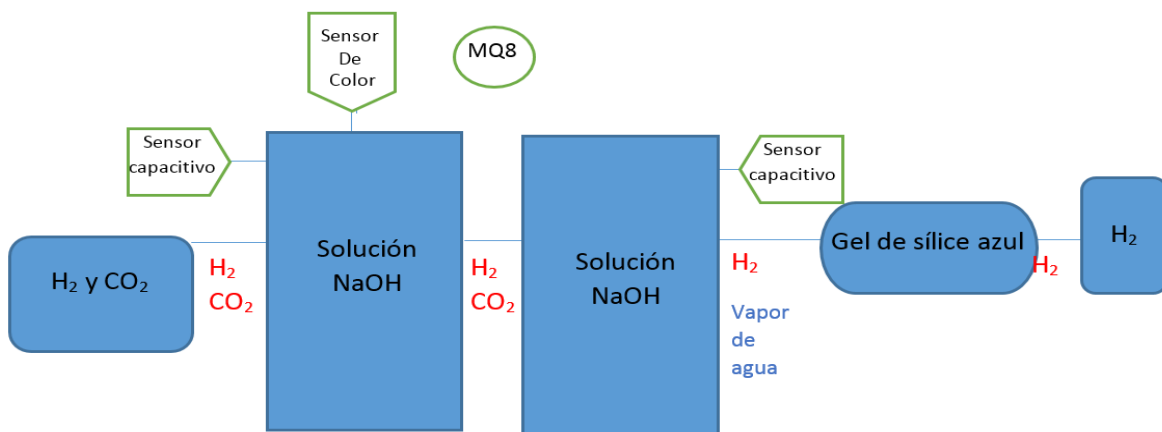
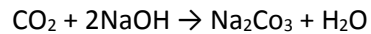


Figura 10 Esquema de filtrado

3.2 Calculo para la concentración

La reacción que se lleva a cabo en la absorción de dióxido de carbono con hidróxido de sodio da como producto bicarbonato de sodio y agua como se muestra a continuación:



De acuerdo a la literatura se utiliza una solución a 6 moles con un volumen de dos litros, a partir de esto se calcula primero los gramos que se deben añadir al agua destilada para lograr esa concentración considerando el porcentaje de pureza del hidróxido de sodio.

Peso moleculares de los elementos en g/mol

Sodio Na = 23

Oxígeno O = 16

Hidrógeno H = 1

La fórmula para calcular la molaridad

$$M = \frac{n}{v}$$

Donde:

n = número de moles

v = volumen (L)

M = molaridad

$$n = \frac{m}{Pm}$$

Donde:

m = masa (g)

En este caso: n= 6m/L

Pm = peso molecular

Teniendo los pesos de los elementos del hidróxido de sodio y conociendo las formulas se procede a realizar la sustitución considerando el 90 % de pureza del NaOH para determinar la cantidad que se deben agregar al agua destilada para tener la concentración requerida:

Peso molecular total:

$$Pm \text{ NaOH} = Pm \text{ Na} + Pm \text{ O} + Pm \text{ H}$$

$$Pm \text{ NaOH} = 23 + 16 + 1$$

$$Pm \text{ NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

Gramos de NaOH (g)

$$g = \frac{6 \text{ m}}{L} \times 2L \times \frac{40 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol NaOH}} \times \frac{100 \text{ gr}}{90 \text{ gr}}$$

Por lo tanto los gramos necesarios son:

$$g = 533 \text{ gramos}$$

3.2. Diseño en CAD

En la propuesta de utilizar un depósito cilíndrico se calculan las medidas de los depósitos de acuerdo al volumen requerido y además el material, ya que se requiere que sea transparente para que la instalación de los sensores se realice por fuera de los depósitos evitando la corrosión debido al NaOH.

Cálculo de volumen en un cilindro:

Fórmula para cálculo del volumen de un cilindro...

$$V = \pi r^2 h$$

Donde:

V = volumen del cilindro

r = radio de la base del cilindro

Despejando...

$$h = \frac{V}{\pi r^2}$$

Debido a que se tienen dos incógnitas y una ecuación se propone un radio de 5 cm para una base de 10 cm y así obtener la altura para el volumen deseado (2 litros = 2000 cm³):

$$h = \frac{2000cm^3}{\pi 5cm^2}$$

$$h = \frac{2000cm^3}{78.539cm^2}$$

$$h = 25.464 cm^2$$

De acuerdo con los cálculos anteriores se determinaron las medidas del depósito las cuales son:

Altura: 26 cm

Diámetro: 10 cm

Teniendo un total de 2.04 litros de volumen,

La entrada en el lado izquierdo se extiende hasta el fondo del recipiente para que el gas introducido tenga una interacción mayor con el NaOH

La diferencia con la salida que esta no cuenta con la extensión al fondo para que el gas acumulado en la parte superior del cilindro circule con mayor facilidad, en el fondo cuenta con un depósito de sólidos para que el carbonato de sodio se acumule mejorando la lectura del sensor de color.

En el centro de la parte superior cuenta con un orificio para la instalación de la sonda de pH la cual servirá para la estimación de capacidad de absorción de dióxido de sodio.

Se diseñó un tapón de drenado para la salida de los sedimentos con un diámetro de una pulgada y un empaque para del mismo diámetro, esto con el fin de drenar el líquido y los sedimentos que se produzcan para no tener que desmontar todo el deposito

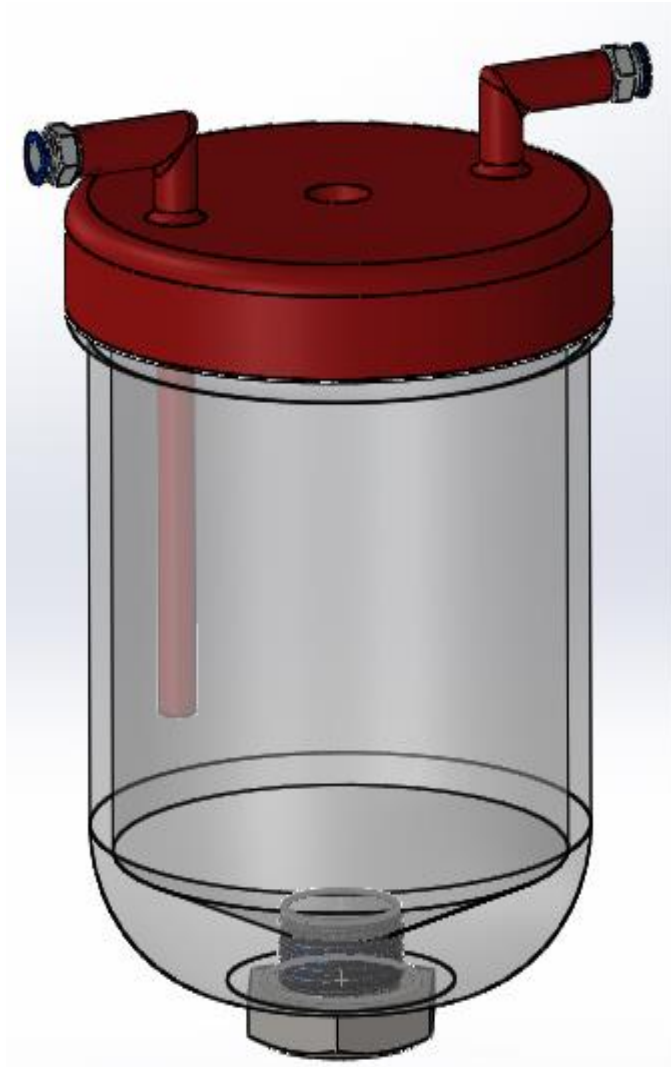
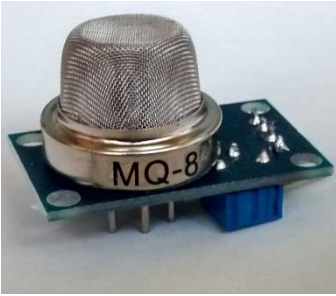


Figura 11 Diseño de depósito



Figura 12 Tapón de purga



El soporte del sensor MQ 8 se diseñó en 3D de acuerdo a las medidas (en mm) del fabricante para posteriormente simular su montaje en el soporte de los depósitos y así tener la seguridad que de que puede ser instalado sin problemas, este sensor ayuda en el diagnóstico de fugas específicamente en detectar una posible fuga de gas hidrógeno del sistema, principalmente en las mangueras de la entrada y la

salida.

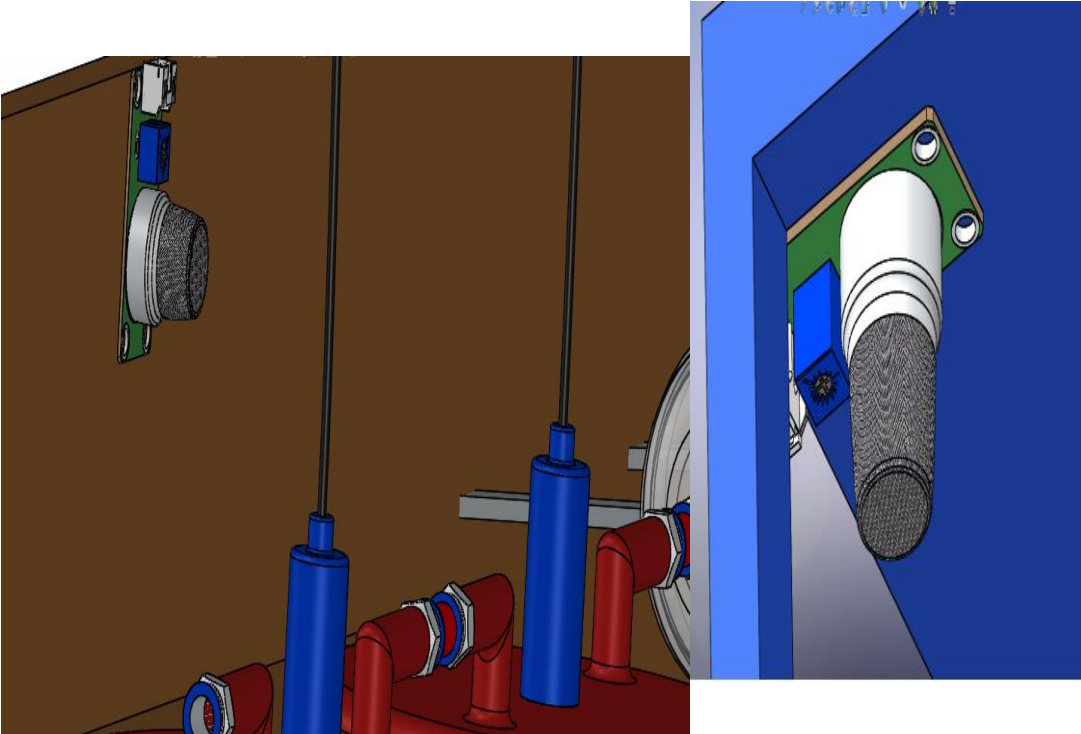


Figura 13 Sensor de CO₂ y simulación de montaje de sensores

Actualmente existen diversos sensores para detección y medición de distintos gases de la serie MQ, de los cuales se eligió utilizar el MQ 8 el cual se utiliza en la medición y presencia de gas hidrógeno y a pesar de que puede medir hasta 10000 ppm para este proyecto solo se requiere que detecte la presencia de dicho gas.

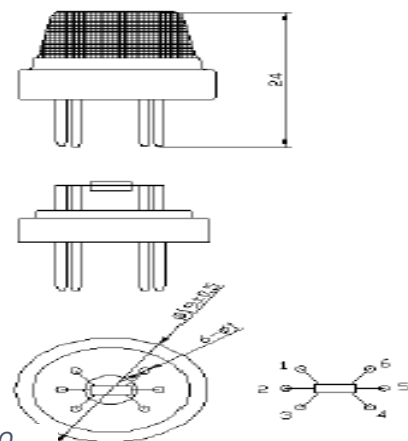


Figura 14 Medidas del sensor MQ

El sensor MQ 8 cuenta con una alta sensibilidad y tiempo rápido de respuesta, además la salida del sensor es una resistencia analógica. Su utilización es muy simple, solo se necesita ser alimentado con 5V, añadir una resistencia de carga con el ajuste de sensibilidad y conectar la salida al convertor análogo – digital.

Características:

- Alimentación 5V DC ó AC
- Temperatura de funcionamiento: -10 a 50 °C
- Potencia de Consumo: menos de 750 mW

Conexión con arduino

Este sensor se utiliza con el microcontrolador arduino para la el diagnóstico de fugas, y se muestra el código para su uso, para su conexión el pin Vcc se conecta a 5v de arduino, el pin GND a GND de arduino y la salida analógica del sensor se conecta al pin A0 del arduino para su lectura y la resistencia de carga debe de estar entre 5KΩ a 33 KΩ.



Figura 15 Conexión de sensor MQ

Código arduino del sensor MQ8:

```
// Pin del Arduino donde conectamos la salida D0 del módulo  
#define Hidro_PIN 8  
  
void setup() {  
  // Se declara el pin como entrada  
  pinMode(GAS_PIN, INPUT);  
  
  Serial.begin(9600);  
  Serial.println("Deteccion de gas con MQ-8...");  
}  
  
//Se guardar el estado anterior y solo mostrar cambios  
int digitalValue = -1;  
  
void loop() {  
  // Leemos el estado del sensor  
  int digitalNew = digitalRead(GAS_PIN);  
  
  // Si el estado del sensor cambió, informamos por el Monitor Serial  
  if (digitalNew != digitalValue) {  
    // Se actualiza el ultimo estado  
    digitalValue = digitalNew;  
    // Transmitimos el nuevo estado  
    Serial.println(String("Nuevo estado del módulo: ") + digitalValue);  
  }  
  
  // Repetimos 10 veces por segundo (cada 100ms)  
  delay(100);  
}
```

Existen diferentes métodos para medir el nivel de líquidos en recipientes, como la utilización de un sensor ultrasónico, sin embargo, este requiere que la tapa del recipiente fuese perforada para su instalación aumentando la dificultad en su construcción y exponiendo el funcionamiento del sensor por la posibilidad de que el hidróxido de sodio salte hacia algún componente del mismo, es por esto que se buscó la forma de diagnosticar una fuga de hidróxido sin tener una interacción con el líquido y se propone la utilización del sensor capacitivo.

El soporte del sensor capacitivo se dibujó también en 3D de acuerdo a las medidas de los fabricantes para la simulación de montaje con los depósitos y el soporte donde será instalado todos los componentes, este sensor forma parte del diagnóstico de fugas, ya que censando el nivel del líquido es una forma de percibir una fuga de NaOH a través de la entrada o salida de drenado o por la fisura de algún recipiente

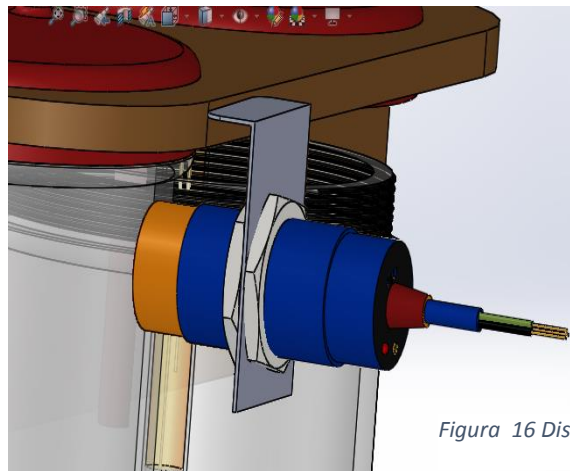


Figura 16 Diseño del sensor capacitivo

Para este proyecto se utiliza el sensor capacitivo LJC18A3-B-Z/BY el cual detecta objetos metálicos y no metálicos en una distancia máxima de 5mm. Puede ser integrado con sistemas digitales como Arduino, Pícs o PLCs, y solo se requiere conectar la salida del sensor a una entrada digital del microcontrolador como se verá más adelante.

La salida de este sensor es de tipo PNP normalmente abierto, por lo que al detectar un objeto la salida será VCC y en estado de reposo GND. Para la utilización en arduino se alimenta con 5V y con 12V o 24V para extender el rango de detección se debe utilizar un optoacoplador para la conexión con Arduino.

La sensibilidad del sensor es regulable mediante un potenciómetro el cual se encuentra junto al cable de alimentación del sensor y un led que enciende cuando el sensor detecta un objeto para su calibración.

Características:

- Rango de detección: 1mm a 5mm (real)
- Polaridad: PNP (ON:VCC / OFF:GND)
- Estado de la salida: Normalmente abierto
- Voltaje de operación: 5-36V
- 3 cables
- Longitud del cable: 1.1m/44.09"
- Puede detectar elementos dieléctricos
- Modelo: LJC18A3-B-Z / BY
- Corriente de trabajo: 20mA máx.
- Corriente de salida (carga): 300mA máx.
- Dimensiones: D18mm*L70mm
- Cuerpo metálico roscado
- Protección: IP67
- Frecuencia de refresco: 0.5 Hz
- Temperatura de trabajo: -25 a 70°C
- Peso: 108 gr.



Conexión

- Marrón (BN): Alimentación 5-36V DC (VCC)
- Negro (BK): Salida NPN NO (Detección: GND, Reposo: VCC)
- Azul (BU): Alimentación GND

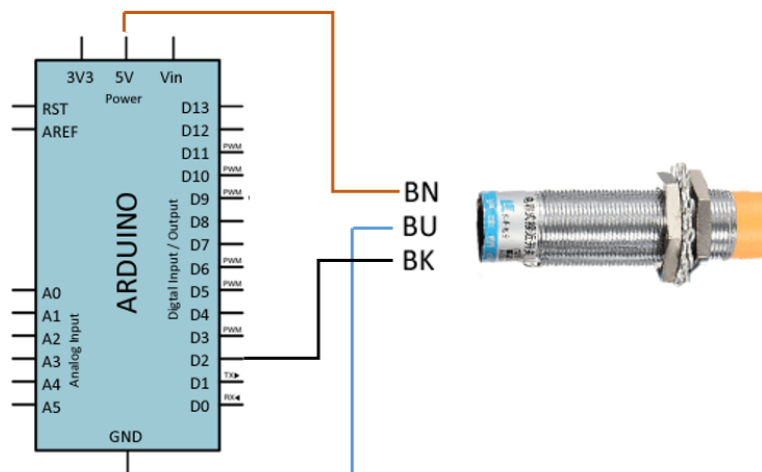


Figura 17 Conexión sensor capacitivo

Código Arduino

```
const int sensorPin = 2;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
    bool state = digitalRead(sensorPin);

    if (state == HIGH)
    {
        Serial.println("Nivel Correcto");
    }
    if (state == LOW)
    {
        Serial.println("Fuga detectada");
    }
    delay(1000);
}
```

Se realizó la simulación de despiece de los sensores y los depósitos para la visualización del proceso de llenado y drenado. El soporte se diseñó con el propósito de representar un panel de experimentos vertical en donde pueden ser instalados los recipientes.

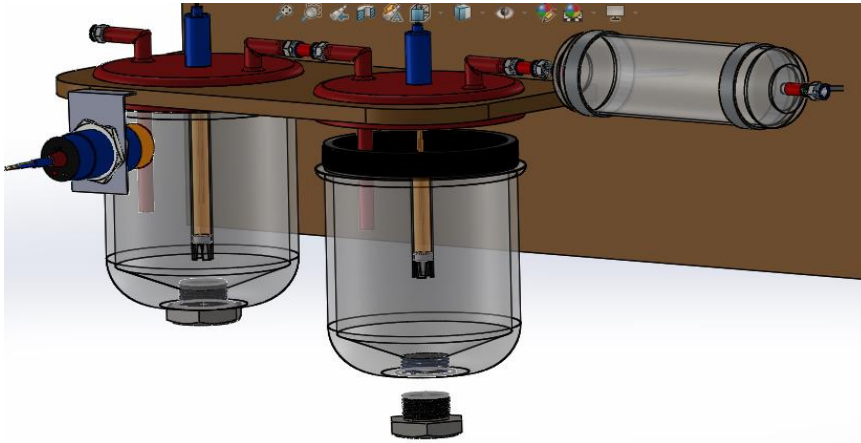


Figura 18 Simulación montaje y despiece.

El montaje se simuló con todos los componentes en la base comprobando que las medidas de los depósitos y los sensores sean correctas para su instalación y la forma de representar el sistema de filtrado con los depósitos de hidróxido de sodio con los sensores de gas y capacitivos para el diagnóstico de fugas, y la sonda de pH para monitorear la capacidad de filtrado de dióxido de carbono.

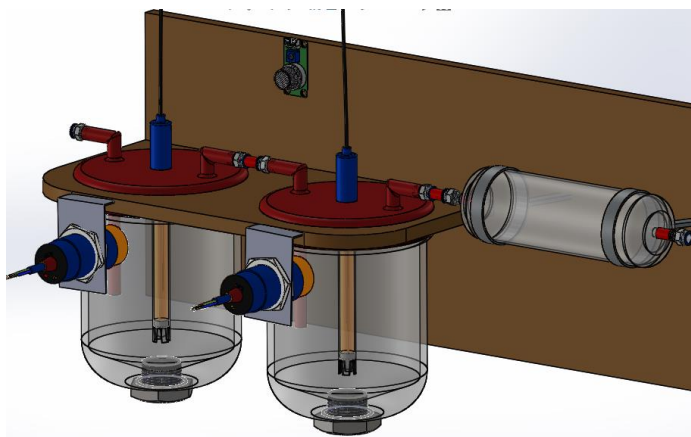


Figura 19 Diseño de esquema de filtrado

3.3 Implementación de los depósitos cilíndricos

Para la implementación del sistema de filtrado se utilizan frascos de vidrio de sosa y cal el cual está compuesto de un 71 y un 75 por ciento de arena (SiO_2), entre un 12 y un 16 por ciento de bicarbonato sódico (Na_2O) y entre un 10 y un 15 por ciento de cal (CaO). Utilizados en fabricación de botellas de refrescos, frascos de alimentos, vasos y vidrios planos. Los frascos de acuerdo al fabricante tienen una superficie lisa y sin poros. Por otra parte el vidrio borosilicato, es más sensible cuando se expone a cambios de temperatura. Es por ello que no se utiliza para aplicaciones con fuertes cambios de temperatura.



Figura 20 Depósito cilíndrico

Los recipientes de vidrio cuentan con una capacidad de 2 litros cada uno, de acuerdo a los cálculos antes mostrados.

Como se vio en el diseño CAD se requieren que la tapa tenga una entrada y salida para el gas por el que se obtuvo una tapa para los depósitos y se realizaron perforaciones para los conectores de acoplamiento, el material de la tapa es de plástico, se optó este material por su bajo costo y por sus propiedades, ya que es un material con alta resistencia a la rotura y a diferencia del vidrio y el metal, es muy ligero ocupando poco espacio.

Este material es muy utilizado en los laboratorios, en los cuales dos tipos de materiales de plástico se utilizan: los elastómeros y los termoplásticos. Por ejemplo los tapones, tubos y tetinas que están hechos de caucho natural o silicona forman parte del grupo de los elastómeros; por su parte los termoplásticos se utilizan en equipos para una aplicación especial de laboratorio.



Figura 21 Tapa depósito cilíndrico

Otros materiales utilizados en la fabricación son el polietileno, la poliamida, el polipropileno y el polimetilpenteno. Todos cuentan con resistencia térmica y soportar todo tipo de sustancias, incluido

los ácidos. El diámetro de las perforaciones es para la utilización de conectores de acoplamiento de plástico para manguera de silicon de ¼ de pulgada. Estos componentes se describen a continuación.

Para sellar la tapa de los frascos se utiliza un empaque o-ring fabricado de nitrilo, el cual es resistente a cualquier sustancia ácida (utilizadas en laboratorios o en la industria alimenticia y farmacéutica, aplicaciones hidráulicas y neumáticas) cuyo diámetro es igual al diámetro interior de la tapa.



Figura 22 Empaque

Para las conexiones de la manguera se utilizan conectores de acoplamiento fabricados de material polipropileno los cuales cuentan con cuerpo roscado, un tuerca de apriete y un empaque o-ring del mismo material para un mejor ajuste y evitar fugas de gas.



Figura 23 Conexión de acoplamiento

Para la conexión de entre depósitos, tanque de gas, y a la salida se utiliza manguera de silicón grado alimenticio con rango de operación de temperatura de -60°C a 150°C esto para evitar que el gas se contamine de componente que pudiera contener si se utilizara otro material.



Figura 24 Manguera de silicón

Para la sujeción de las mangueras a los conectores de acoplamiento se utilizan abrazaderas de metal a presión para manguera de silicón o plástico, se utilizan estas por el diámetro reducido de la manguera además que su utilización es más fácil a comparación de las que cuentan con un tornillo de ajuste ya que las abrazaderas utilizadas solo se abren con pinzas para introducirlas en las conexiones y al soltarlas en el lugar deseado sella la unión a presión evitando fugas.



Figura 25 abrazadera metálica

Como se vio en el diseño en CAD se propuso instalar una extensión en la entrada de los depósitos para mejorar la interacción del gas con la solución de NaOH, para esto se utiliza un tubo de vidrio borosilicato conectado por dentro del recipiente al conector de acoplamiento.



Figura 26 Extensión de vidrio

Para la instalación de los depósitos se utilizan abrazadera omega a las que se le soldaron soportes para los sensores capacitivos y de color con chapa calibre 18, con una soldadora de arco con electrodo 6013



La medida de la abrazadera es de 3 pulgadas de acuerdo al diámetro de los recipientes y es sujeta por medio de tornillos de un $\frac{1}{4}$ de pulgada por medio de roldana y tuerca, en la parte posterior se colocó un trozo de caucho para poder apretar los recipientes evitando que se fisuren por la dureza del material de la abrazadera.



Figura 27 Soporte depósito y sensores

Se fabricó la base para los depósitos mediante ángulo de metal para el marco y así darle firmeza, una placa de tablaroca para el fondo para evitar posible ruidos por el contacto como lo sería con metal y en la base del soporte se utilizó "T" tubular para que la base pueda mantenerse vertical.

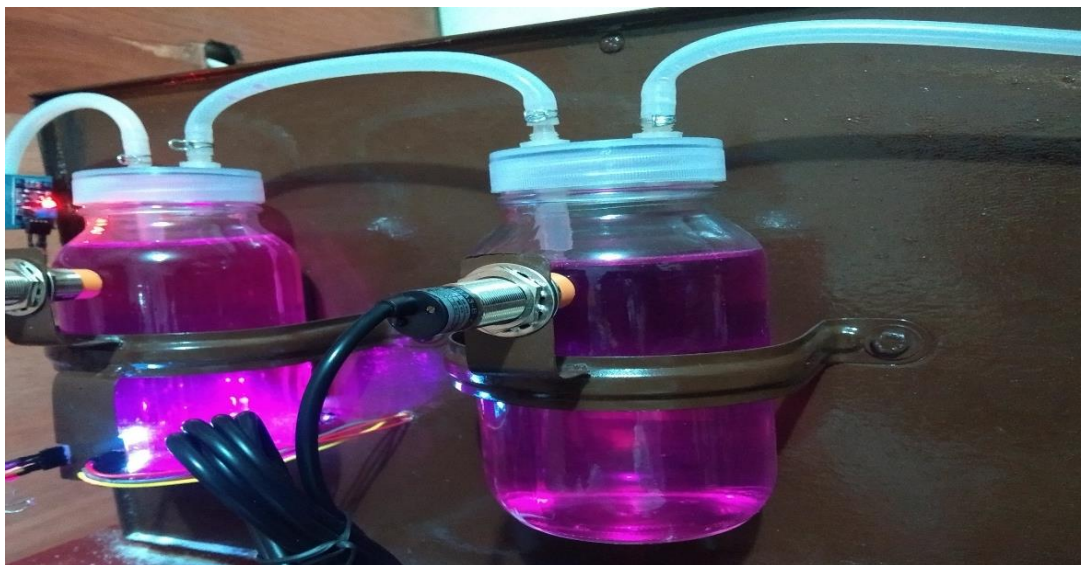


Figura 28 Base para los depósitos

3.3.1 Soporte de sensores

Para instalar los sensores en el soporte de los depósitos se utilizaron dos abrazaderas omega, en la primera se soldaron dos soportes para el sensor de color y para el sensor capacitivo, en la segunda abrazadera solo se soldó un soporte para el sensor capacitivo, en la parte posterior se instaló un led blanco para tener una mejor lectura del sensor de color evitando que la luz reflejada por el mismo interfiera en la lectura.



Figura 29 Bases para sensores

3.4 Diseño de la segunda propuesta de depósito

En la propuesta de utilizar un depósito cuadrado se calculan las medidas de los depósitos de acuerdo al volumen requerido y además el material, ya que se requiere que sea transparente para que la instalación de los sensores se realice por fuera de los depósitos evitando la corrosión debido al NaOH.

Cálculo de volumen en un ortoedro:

Fórmula para cálculo del volumen de un ortoedro...

$$V = L \times L \times H$$

Donde:

V = volumen del cilindro

L = medida de un lado de la base cuadrada

H = altura del ortoedro

Despajando...

$$H = \frac{V}{L^2}$$

Debido a que se tienen dos incógnitas y una ecuación se propone una longitud de 10 cm para un lado de la base y así obtener la altura para el volumen deseado (2 litros = 2000 cm³):

$$H = \frac{2000 \text{ cm}^3}{10 \text{ cm}^2}$$

$$H = \frac{2000 \text{ cm}^3}{100 \text{ cm}^2}$$

$$H = 20 \text{ cm}^2$$

De acuerdo a los cálculos realizados se determinaron las dimensiones que debe tener para lograr un volumen de 2 litros, la geometría del depósito se determinó por el propósito de utilizar un sensor de color para medir la luz que lo atraviesa, por tal motivo las paredes deben ser planas para evitar la refracción de la luz, el material debe ser transparente y lo más delgado posible.

Las medidas del depósito las cuales son:

Altura H = 21 cm

Base L = 10 cm x 10 cm

El material propuesto es vidrio monolítico (flotado) de 3 mm de espesor por su bajo costo y fácil adquisición y resistencia a la corrosión, ya que si se utiliza mica el hidróxido de sodio lo opacaría después de determinado tiempo.

Se propone el uso de vidrio flotado los cuales son utilizados para la fabricación de espejos

decorativos ventanas y puertas de todos los tipos para viviendas y negocios, etc. Se obtiene mediante la mezcla de compuestos vitrificantes, como la sílice; fundentes, como los alcalinos y estabilizantes, como la cal.

Este proceso de fabricación lo hace que tenga una superficie plana, y puede pasar a través de él fácilmente la luz a diferencia de por ejemplo los vidrio bajo emisivos los cuales no permiten o en baja cantidad el paso de la luz o la radiación solar.

Además para mejorar la medición del sensor de color se realizan unas perforaciones en los lados del depósito y se colocan porta objetos, este proceso se describe más adelante.

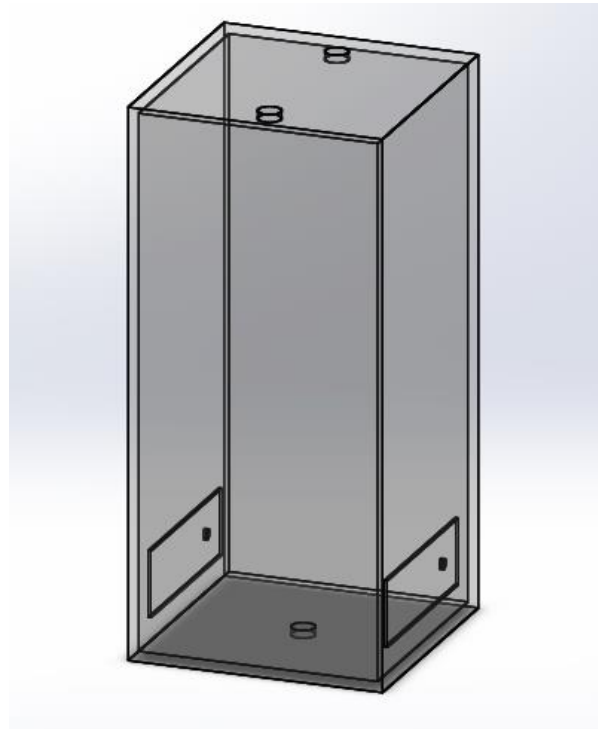


Figura 30 Diseño ortoedro

En la tapa del recipiente se deben realizar dos perforaciones para poder instalar los conectores de acoplamiento, estas perforaciones son de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro.

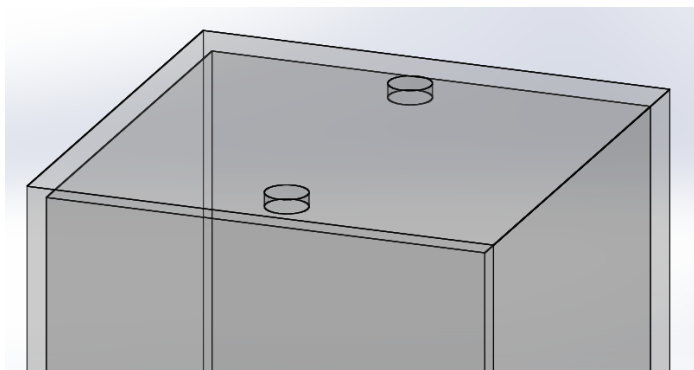


Figura 31 Perforaciones ortoedro

Posteriormente se instalan los conectores de acoplamiento en donde se conectan las mangueras de silicón, en la primera conexión es completa, es decir, de ambos lados, la segunda solo tiene el acoplamiento del lado exterior, esto para que el gas acumulado en la parte superior del depósito salga con mayor facilidad.

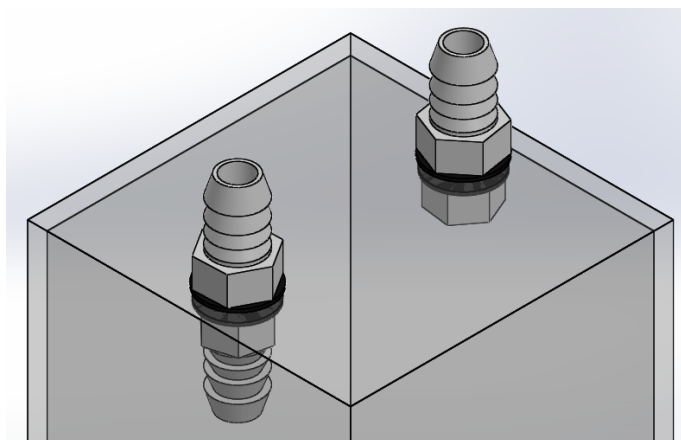


Figura 32 Instalación conectores

Se conecta la extensión de vidrio en la primera conexión de acoplamiento para tener una mejor interacción el gas con el hidróxido de sodio para que este recorra el depósito desde el fondo hacia la parte superior donde se acumule y salga por el segundo acoplamiento.

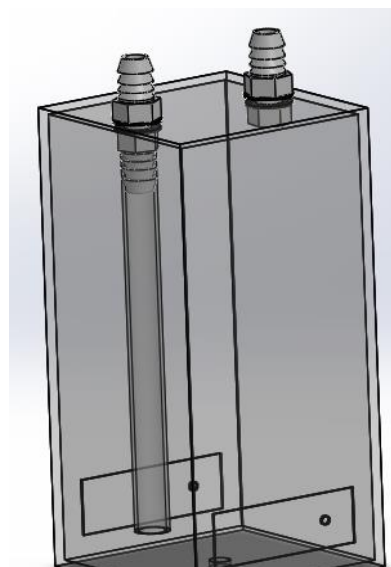


Figura 33 Diseño de depósito

En la base también se realiza una perforación de ½ pulgada de diámetro para la instalación de una conexión de acoplamiento para que después del proceso del filtrado la solución se drene por esta parte conectado a una manguera de silicón para poder ser dirigido con facilidad a donde se desee, además de facilitar el llenado con la nueva solución de hidróxido de sodio.

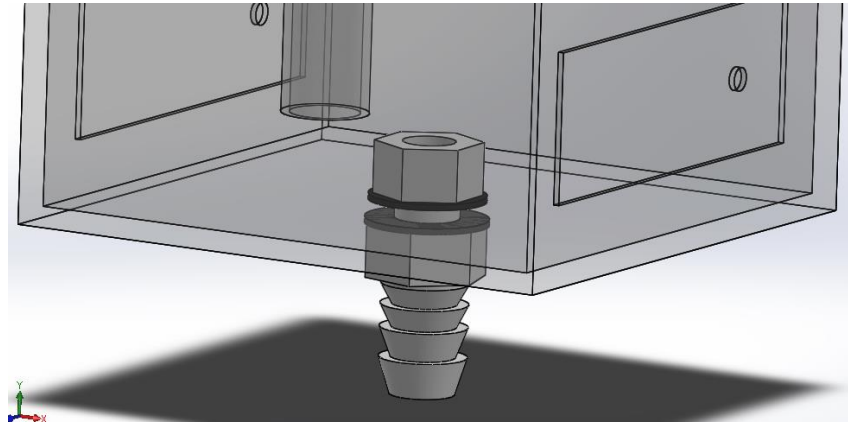


Figura 34 Salida de drenado

Una parte importante del diseño es la perforación en la parte inferior derecha y en la cara de frente a ella del lado izquierdo, debido a que el vidrio que se utiliza es de 3 mm se busca reducir ese grosor en donde estará instalado el sensor de color, se propone realizar una perforación de 3/8 de pulgada de acuerdo a la medida de la matriz de fotodiodos del sensor de color, ya realizada la perforación se coloca un portaobjetos de 0.8 mm de espesor, siendo la otra perforación para colocar el led de iluminación de sensor de color.

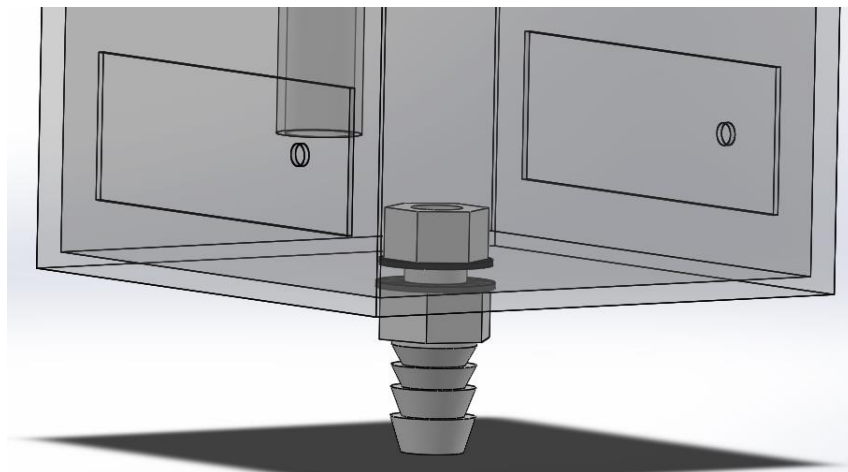


Figura 35 Portaobjetos

Otra forma de medir el pH de una solución es por medio de soluciones indicadoras (titulaciones), las cuales colorean de un color a la solución en cierto valor de pH y en otro color cuando cambia su valor, estos indicadores viran de acuerdo a cierto rango característico de pH por ejemplo la fenolftaleína cuyo valor de viraje esta entre 10 y 8.2, es decir, cuando el pH es mayor a 10 el color será magenta, y en el valor de 8.2 la solución pierde el color magenta para volver al color original y más aún si el valor baja del valor neutro que es el 7 tendrá un viraje al color naranja la cual ya es una solución ácida.

Se propone el uso de este indicador ya que es una forma de estimar el pH sin necesidad de que se interactúe directamente con el hidróxido de sodio, el cual es altamente corrosivo y dañaría cualquier dispositivo electrónico que se instale dentro del depósito. El cambio y degradación de color se obtiene mediante un sensor de color TCS 3200 el cual es instalado en la parte externa del depósito sin exponer su funcionalidad por la corrosión, otra ventaja es que de esta forma también se puede conocer la capacidad de absorción del hidróxido de sodio conforme transcurre el proceso de filtrado de dióxido de carbono.

El sensor de color se dibujó en un programa CAD de acuerdo a las medidas del fabricante las cuales se encuentran en la hoja de datos para poder simular su montaje y utilización con respecto a los depósitos previamente diseñados, así como la base en la que es montado.

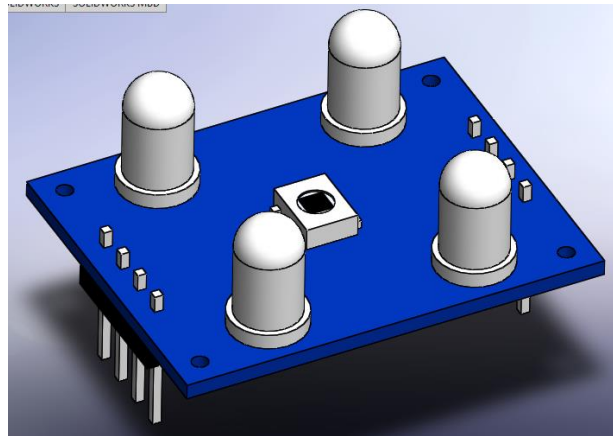


Figura 36 Diseño TCS

El sensor TCS3200 es un sensor óptico el cual es capaz de medir el color de un objeto ubicado enfrente de él (10 mm de distancia)

por medio de un autómatas o procesador como Arduino. Como se vio anteriormente está formado por una matriz de fotodiodos de silicón conectados a un convertidor de corriente a frecuencia, en un único integrado CMOS de cual el sensor lleva su nombre. La disposición de los fotodiodos esta pensada para disminuir el efecto la incidencia no uniforme de la luz.

La salida del sensor es una onda cuadrada del 50% de trabajo y su frecuencia es proporcional a la intensidad luminosa incidente sobre él. La tensión de alimentación del sensor es de 2.7V a 5.5V.

Este sensor cuenta con 8 pines para su instalación; S0, S1, S2, y S3, son entradas digitales y una salida digital Out. Y ya que se va a utilizar con la tarjeta Arduino se requieren de al menos 3 pines digitales.

Para su instalación se debe alimentar el módulo conectando los pines Gnd y Vcc, a Gnd y Vcc de Arduino respectivamente. Los pines S0 y S1 controlan la frecuencia de la salida la cual para su uso con arduino se deben conectar de acuerdo a la tabla mostrada en el capítulo anterior para que trabajen a una frecuencia del 20% y la desactivación del módulo. Estos pines se pueden conectar a dos salidas digitales, o bien podemos conectarlas a 5V para que el módulo permanezca prendido todo el proceso de filtrado.

Conexión

La conexión se propone de acuerdo a las tablas mostradas en el capítulo anterior

- GND: Del microcontrolador.
- OE (entrada): Salida de frecuencia (activo bajo).
- OUT (salida): Salida en frecuencia.
- S0, S1 (entradas): Selección de la escala de frecuencia en la salida.
- S2, S3 (entradas): Selección del tipo de fotodiodo.
- VDD: Voltaje de alimentación (de 3v a 5v).

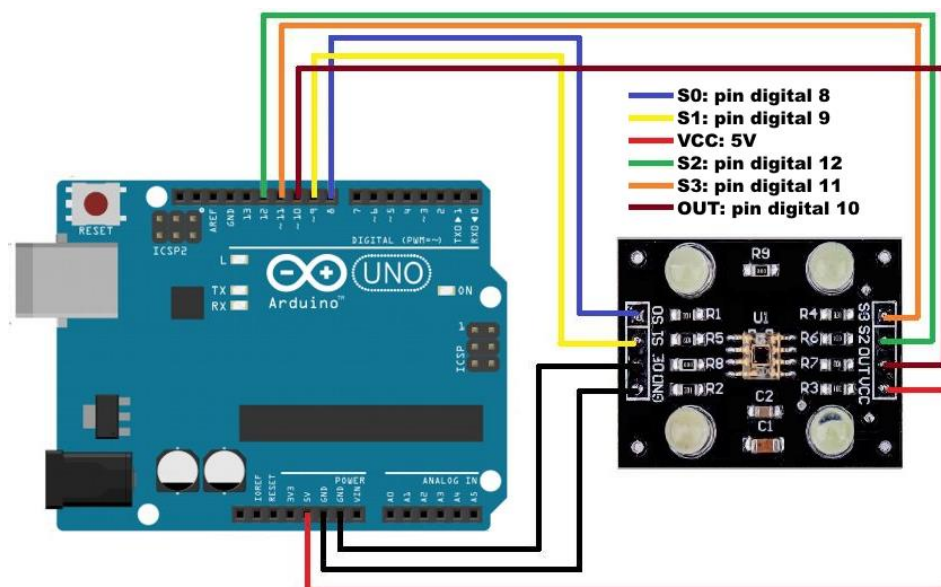


Figura 37 Conexión TCS

Código de sensor de color

```
#define S0 8
```

```
#define S1 9
```

```
#define S2 12
```

```
#define S3 11
```

```
#define salidaSensor 10
```

```
int frecuenciaRojo = 0;
```

```
int frecuenciaVerde = 0;
```

```
int frecuenciaAzul = 0;
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
    pinMode(S0, OUTPUT);
```

```
    pinMode(S1, OUTPUT);
```

```
    pinMode(S2, OUTPUT);
```

```
    pinMode(S3, OUTPUT);
```

```
    pinMode(salidaSensor, INPUT);
```

```
    // Se fija la frecuencia de trabajo a 20% para arduino
```

```
    digitalWrite(S0,HIGH);
```

```
    digitalWrite(S1,LOW);
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
}
```

```
void loop()

{

  // Se calibra con filtro rojo

  digitalWrite(S2,LOW);

  digitalWrite(S3,LOW);

  frecuenciaRojo = pulseIn(salidaSensor, LOW);

  Serial.print("Rojo = ");

  Serial.print(frecuenciaRojo);

  delay(100);

  // Se calibra con filtro verde

  digitalWrite(S2,HIGH);

  digitalWrite(S3,HIGH);

  frecuenciaVerde = pulseIn(salidaSensor, LOW);

  Serial.print(" Verde = ");

  Serial.print(frecuenciaVerde);

  delay(100);

  // Se calibra con filtro azul

  digitalWrite(S2,LOW);

  digitalWrite(S3,HIGH);

  frecuenciaAzul = pulseIn(salidaSensor, LOW);

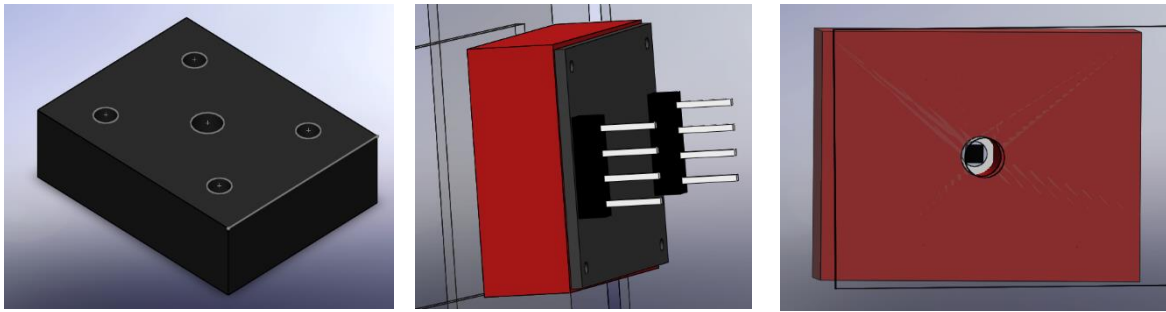
  Serial.print(" Azul = ");

  Serial.println(frecuenciaAzul);

  delay(100);}

}
```

El sensor de color es colocado en una base, donde los led's son introducidos en los orificios laterales y el orificio en el centro atraviesa toda la base para el integrado TCS3200, de esta forma se aísla la luz producida por los led's del sensor evitando que se reflejen los objetos del exterior, y por otro lado el sensor capta solo la luz del led que se encuentra enfrente del sensor midiendo mejor el color de la solución.



El mismo procedimiento para el led, esto para facilitar su instalación y concentrar mejor la luz hacia el sensor de color

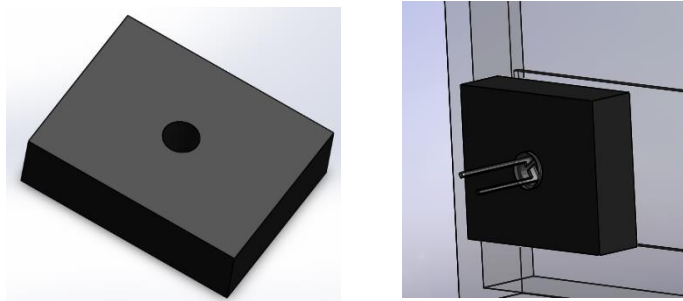


Figura 38 Bases de los sensores

Quedando el sensor y el led de frente con el propósito de tener una mejor lectura al incidir mejor la luz en la matriz de fotodiodos, reduciendo reflejo de la pared, y siendo delgada en el área de lectura por la colocación del portaobjetos.

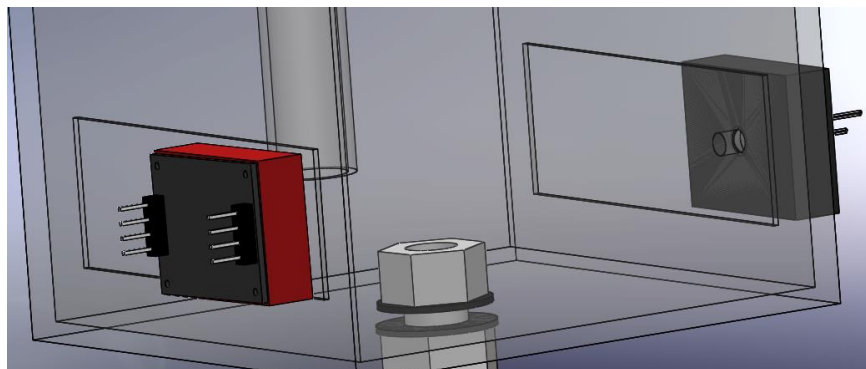
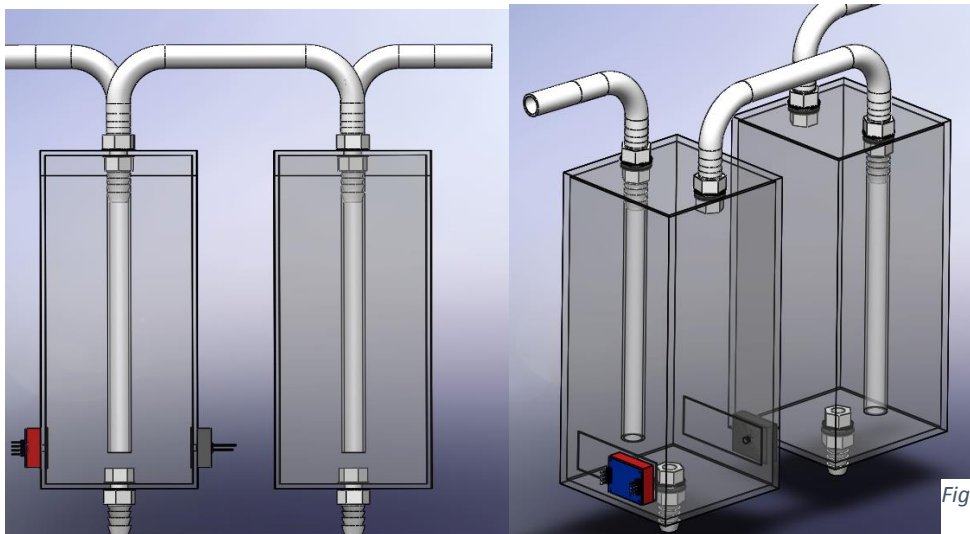
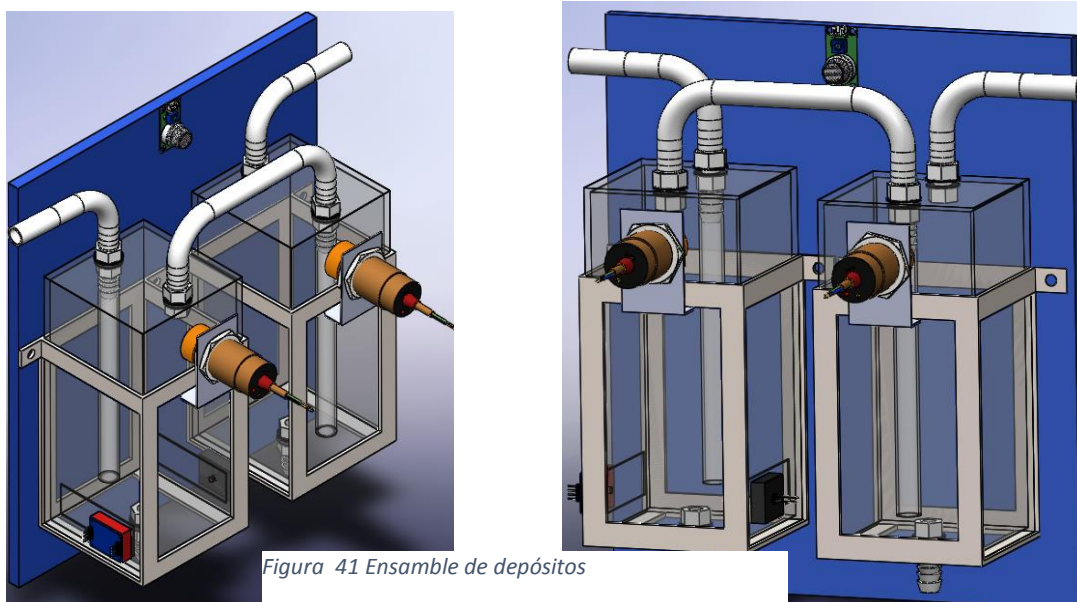


Figura 39 Diseño de instalación de sensores

Se muestra la forma en la cual deben ser conectados los depósitos para que al ser colocados en sus soportes el sensor de color y el led de iluminación no interfieran y afecte la medición, entre la pared y la base, de esta forma se reduce el ruido en la medición de color por el lugar de instalación del sensor del sensor de color, se facilita la salida del gas hacia el otro depósito e interactúa mejor con la solución de NaOH (conectando la salida del primer depósito a la entrada con extensión del segundo).



Finalmente se muestra el ensamble y conexión de los depósitos con los sensores en una base la cual fue diseñada para poder colocarla en forma vertical y facilitar el llenado y drenado de los depósitos sin la necesidad de que sean sacados de las bases.



3.5 Implementación de los depósitos rectangulares

Ya que se determinaron las medidas y se realizó el diseño en CAD se procede con la construcción de los depósitos, para la construcción de estos depósitos se inicia con el corte del vidrio en las medidas antes calculadas para cada cara siendo 8 rectangulares para los lados y 4 cuadradas para la base y tapa



Ya cortadas las piezas se continúa a realizar las perforaciones en las tapas superiores donde se colocan los conectores de acoplamiento para la conexión de la entrada y salida así como para las mangueras de silicón que comunican a los depósitos, las perforaciones se realizaron con una broca para vidrio de 3/8 de pulgada y se instalan los conectores.

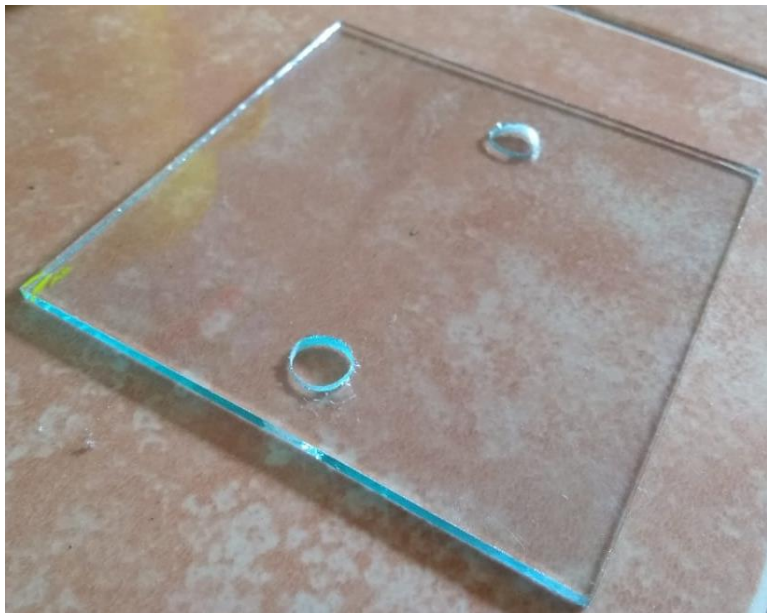


Figura 42 Perforación de vidrio

También se realiza una perforación de la misma forma y de la misma medida en las tapas inferiores para conectar el conector de acoplamiento el cual servirá de drenado para el agua y el bicarbonato de sodio productos del proceso de filtrado y se requiera ser remplazado por solución de hidróxido de sodio para un nuevo proceso.

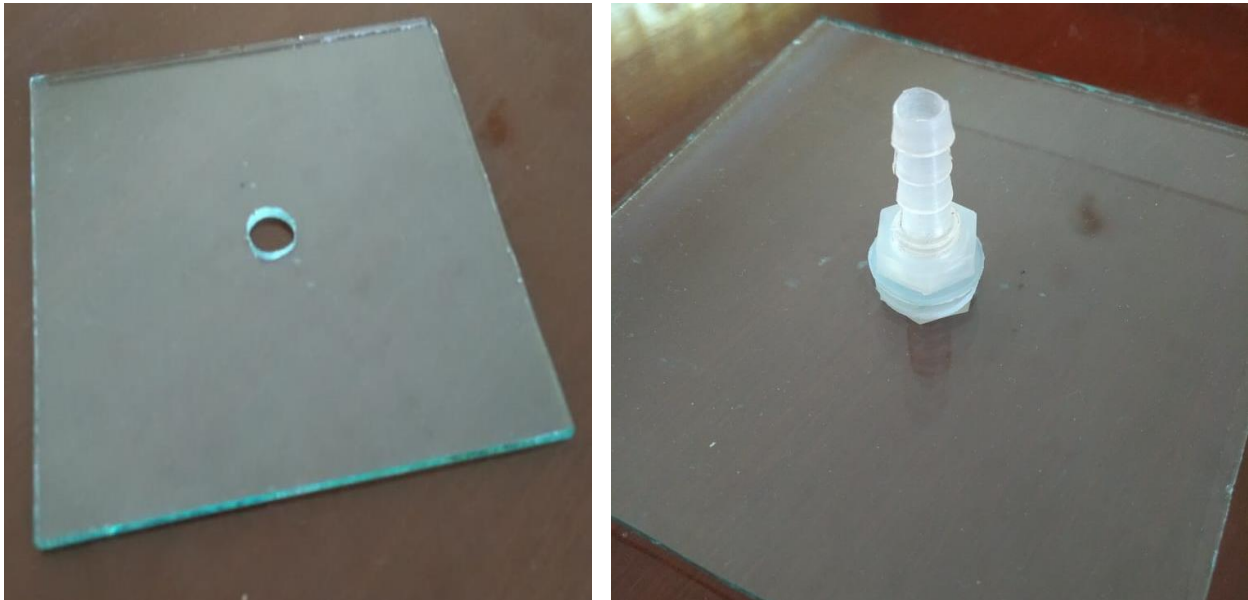


Figura 43 Colocación de conector

En las caras laterales también se realizan perforaciones pero con diámetro de un $\frac{1}{4}$ de pulgada ya que tanto el diodo para iluminar el sensor y la matriz de fotodiodos cuentan con esta medida aproximadamente, esta perforación se cubre con un porta objetos de 0.8 mm de grosor con el fin de reducir el grosor del vidrio que es de 3 mm mejorando la medición de color para determinar la capacidad de filtrado del NaOH.



Figura 44 Colocación de portaobjetos

Una vez colocados los conectores de acoplamiento en las tapas superiores se coloca la extensión de vidrio antes de que sean unidas todas las caras, las extensiones se colocan en la entrada de cada recipiente respectivamente con el fin de que el gas que se introduzca viaje desde el fondo hasta la parte superior para tener la mayor interacción posible con el hidróxido de sodio para mejorar el filtrado.

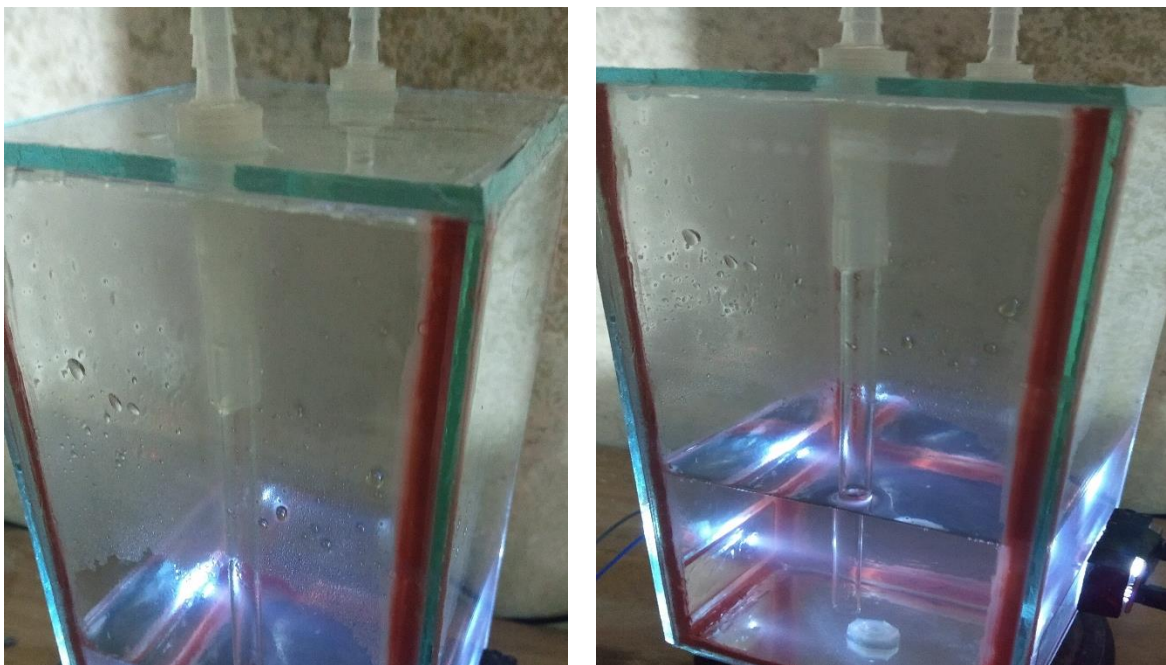


Figura 45 Extensión de vidrio

Finalmente se prosigue con el pegado de las caras de vidrio para armar los depósitos, se utiliza silicón para altas temperaturas (rojo) debido a que si se utiliza silicón normal (blanco o transparente) el hidróxido de sodio lo reblandece y se producen pequeñas fugas las cuales son un problema por lo corrosivo del hidróxido de sodio.



Figura 46 Pegado de vidrio

Se fabricó una base metálica donde se instalan los depósitos y los sensores con perfil solera comercial de 1/8 de pulgada X 1/2 de pulgada con dos soportes laterales para poder ser instalada verticalmente y así sea más fácil el llenado y drenado de los depósitos, la base se diseñó de modo que no haya problema al instalar el sensor de color y el led de iluminación y para el montaje de los sensores capacitivos.

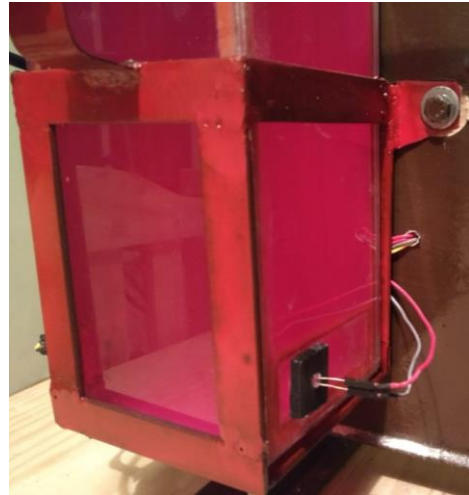


Figura 47 Base metálica

Los soporte se instalan en una base vertical para representar la forma en la que se deben colocar los depósitos de acuerdo al diseño y a las necesidades del proceso de filtrado, se instalaron los tapones en la salida de drenado.

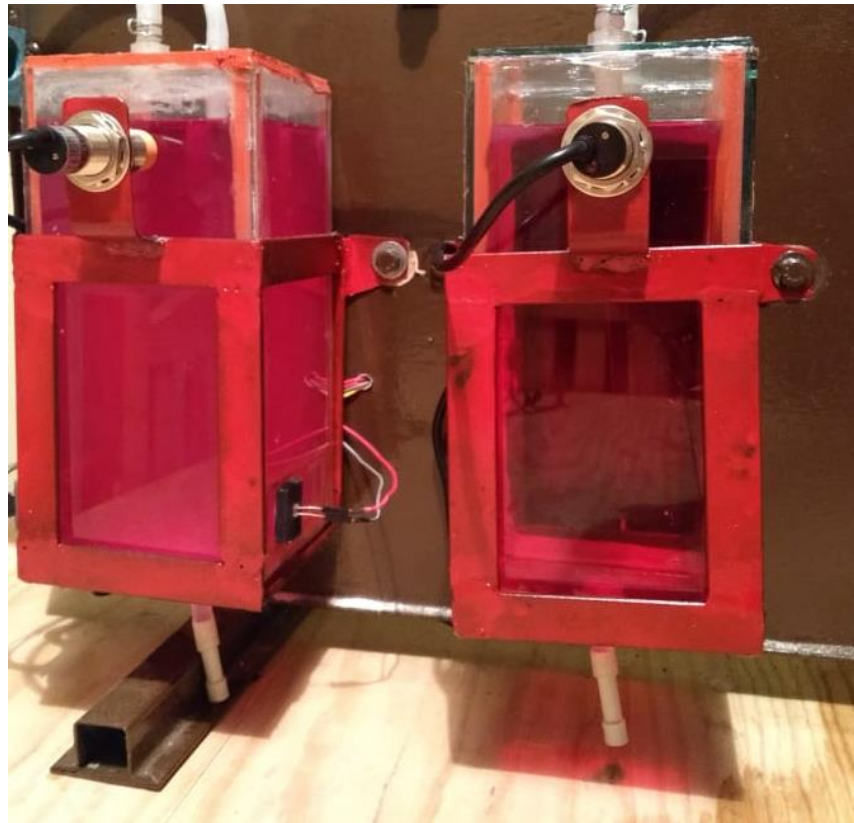


Figura 48 Montaje de depósitos

Por último son instalados los sensores que forman parte del sistema de filtrado, el sensor de color y el led que lo ilumina en la parte frontal, se colocan las bases donde se instalan y estas bases son colocadas en los filtros, tanto el sensor como el led entran a presión en su base.



Figura 49 Instalacion de sensor y led

Se instalan los sensores que forman parte del diagnóstico de fugas, los sensores capacitivos se colocan en la base unida a los soportes de los depósitos para monitorear el nivel de líquido y el sensor de hidrogeno se instala en medio de los dos depósitos para detectar fuga de gas.



Figura 50 Sensores diagnóstico de fugas

3.5.1 Filtro de kalman

Una vez que se realiza la medición de color con el sensor y la tarjeta arduino los datos se envia a un archivo de excel por medio del programa PLX_DAQ, ya teniendo el archivo en excel de los valores medidos se crea una aplicación simple en matlab para acceder a estos datos como se muestra en la figura 51.

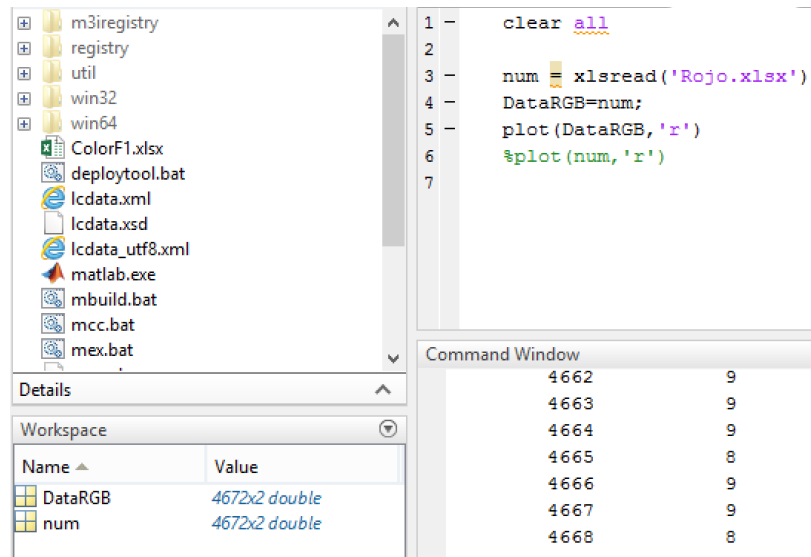


Figura 51 Código matlab

A partir de los datos en matlab los datos son tomados por simulink a través de un from workspace el cual es conectado a la entrada del bloque de Kalman el cual contiene el código del algoritmo, el bloque en simulink se muestra en la figura 53 en donde son colocados dos scopes para poder observar la gráfica de los datos antes y después de la estimación.

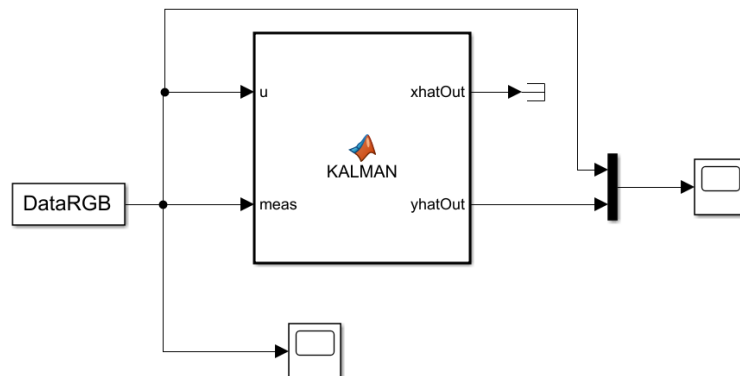


Figura 52 Bloque filtro de kalman

La configuración del from workspace se muestra en la figura 54 en donde se indica el nombre de la variable que tiene los datos del archivo de excel.

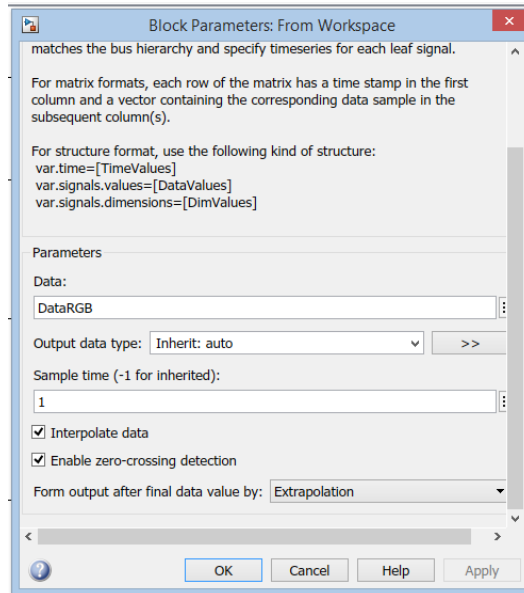


Figura 53 Configuración from workspace

En la figura 54 muestra el código de la función utilizada del algoritmo de kalman para la estimacion de los valores medidos, los cuales contienen ruido que impide ver con claridad la curva descrita por la degradacion del color en el sistema de filtrado, con esta curva se puede comprobar la absrción de dióxido de carbono por el hidróxido de sodio ya que la degradación de color indica la disminución de los valores de pH.

```
function [xhatOut, yhatOut] = KALMAN(u,meas)

persistent P xhat A B C Q R
if isempty(P)
    % Inicialización
    xhat = 0;
    P = 0;
    A = 0.914;
    B = 0.25;
    C = 0.344;
    Q = 0.01^2;
    R = 0.1^2;
end
% Matriz de covarianza y estado estimado
xhat = A*xhat + B*u;
P = A*P*A' + Q;
% Ganancia de Kalman
K = P*C'/(C*P*C' + R);
% Cálculo de la medida residual
resid = meas - C*xhat;
% Actualización de la estimación de covarianza de estado y error
xhat = xhat + K*resid;
P = (eye(size(K,1))-K*C)*P;
% Resultado
xhatOut = xhat;
yhatOut = C*xhatOut;
```

Figura 54 Función algoritmo de kalman

3.6 Diagnóstico de fugas

Para el diagnóstico de fugas se diseñó una interfaz utilizando Qt designer y programación en python para la comunicación con la tarjeta arduino y lectura de los sensores por medio de la comunicación firmata , las funciones de esta interfaz son:

Permitir reconocer el nivel de líquido a través de un sensor capacitivo en cada depósito, si este está en estado correcto por medio de una señal gráfica y la etiqueta que indique que el nivel es correcto de lo contrario una señal grafica para cuando el nivel de NaOH ha disminuido y de esta forma detecta una fuga de NaOH por medio de una etiqueta, el sensor MQ 8 en la salida digital detecta presencia de gas y por medio de la interfaz permite observar si existe fuga con una señal y una etiqueta.

También permite observar cuando el hidróxido de sodio está absorbiendo CO_2 y cuando ya disminuyó su capacidad por medio de imágenes que representan la coloración magenta de la fenolftaleína en el primer estado y el líquido transparente del segundo estado, mostradas en el diseño CAD de los depósitos, y finalmente muestra una gráfica de la entrada analógica la cual lee el sensor de color permitiendo observar el comportamiento del proceso de filtrado.

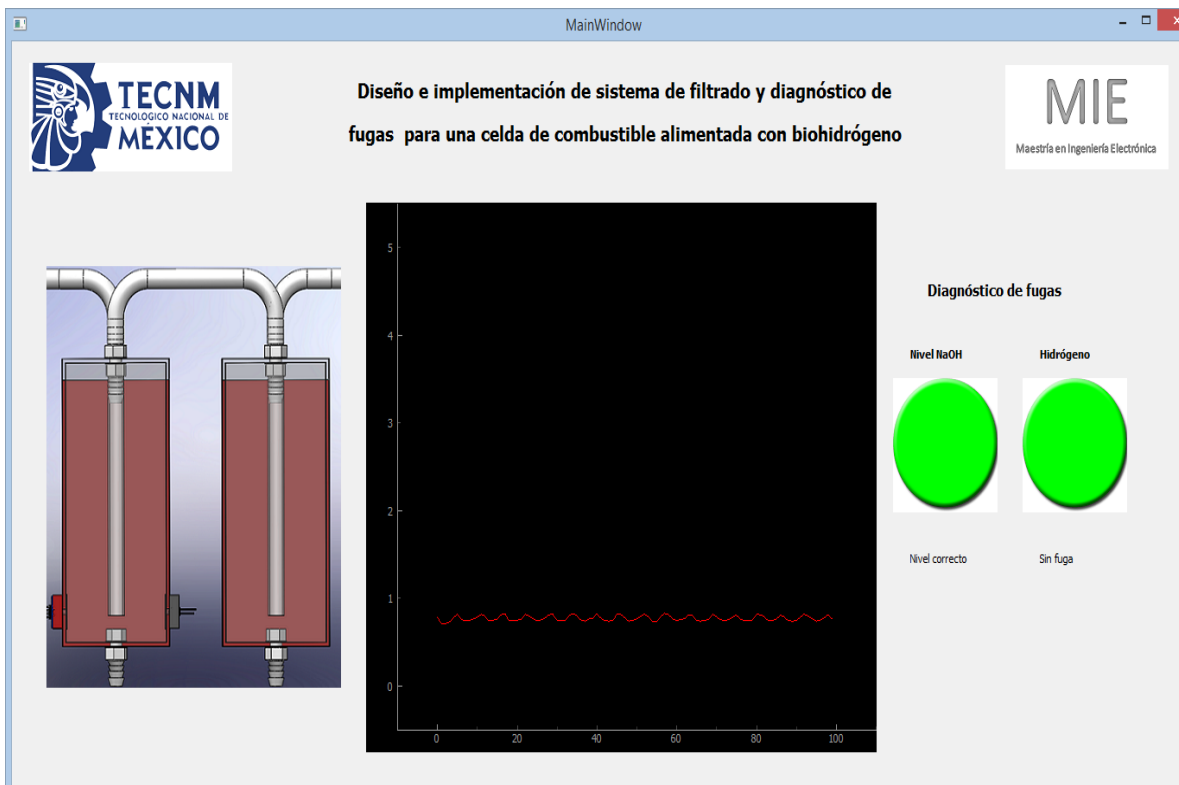


Figura 55 Interfaz gráfica

Cuando el filtrado es normal y no se detecta fugas de líquido y/o gas así se muestra la interfaz, el color de la solución se muestra en color rojo y las señales de fugas en verde así como las etiquetas indican que no se ha diagnosticado alguna fuga.

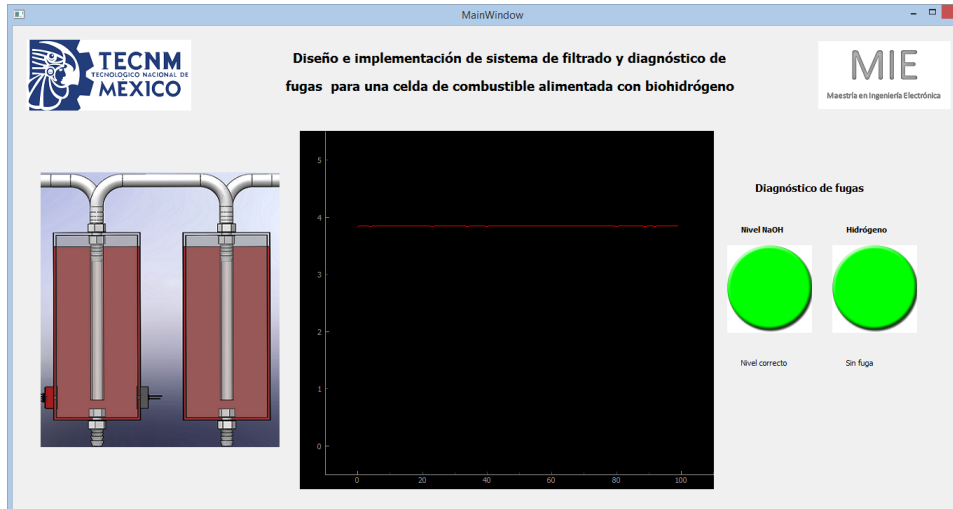


Figura 56 Comportamiento del color

Conforme se va degradando el color la gráfica lo muestra, mientras se va absorbiendo dióxido de carbono el pH del hidróxido de sodio va disminuyendo y los valores de lectura del sensor de color bajan en el momento en que cambia el color se muestra en la gráfica

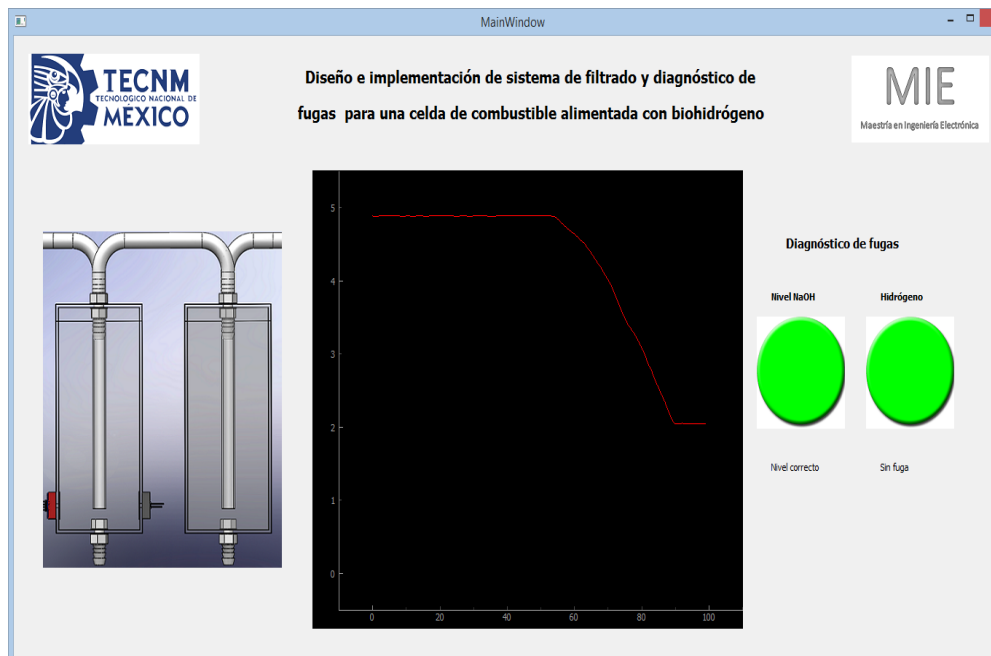


Figura 57 Cambio de color en interfaz

En cuanto al diagnóstico de fugas, en las imágenes anteriores se muestran si detección de fugas de líquido o gas, cuando el primer sensor capacitivo detecta fuga en el primer depósito se muestra en el interfaz al igual que en el segundo depósito indicando el número, se muestran los tres casos en cuanto al nivel de líquido.



Figura 58 Detección de fugas NaOH

Por último si se detecta fuga de gas en el sistema el sensor de hidrógeno lo detecta y la interfaz lo muestra en color rojo y lo indica la etiqueta, en este caso no se requiere conocer la cantidad de gas que el sensor lee del ambiente, solo se requiere saber si existe presencia de gas o no, por tal motivo se utiliza la salida digital del sensor MQ 8.



Figura 59 Detección fuga de hidrógeno

CAPÍTULO IV. Desarrollo experimental y análisis de resultados

4.1 RESUMEN CAPÍTULO

En este capítulo se describe el procedimiento que se llevó a cabo para las pruebas experimentales del sistema de filtrado mediante la captura de CO₂, se describe la metodología de experimentación y se explican los pasos realizados en las mediciones de color.

Ya que se utilizaron dos geometrías diferentes se muestran los resultados obtenidos de cada una considerando que la forma de absorción es la misma para las dos, la diferencia está en las mediciones realizadas de color.

4.2 Metodología de experimentación

Prueba de colorimetría del sistema de filtrado

PROPÓSITO:

Determinar la capacidad de filtrado por medio de absorción de CO₂ en la NaOH mediante la reducción de pH obteniendo el cambio de color con fenolftaleína.

Material:

Hidróxido de sodio (NaOH), fenolftaleína, sensor de color.

Resultados esperados:

Obtener un cambio de color de rosa al transparente para comprobar la reducción de pH lo que indica que la NaOH ha perdido capacidad de absorción de dióxido de carbono.

Una vez realizada la experimentación de filtrado se comprueba el diagnóstico de fugas.

4.3 Disolución de NaOH y fenolftaleína

De acuerdo a la literatura se requiere que la solución de NaOH de 6 moles así que se calculó el volumen del líquido requerido en el capítulo anterior, por lo que se inicia diluyendo la cantidad determinada de hidróxido de sodio en dos litro de agua destilada posteriormente la cantidad de NaOH para alcanzar la molaridad y finalmente se agregaron 5 ml de fenolftaleína esto solo para un deposito por lo que se repite el procedimiento para el segundo recipiente.

Se debe tener las medidas de seguridad necesaria al realizar este procesamiento, ya que el NaOH al ser diluido en agua produce calor por encima de los 35 grados Celsius por lo cual si se toca el recipiente este puede producir quemaduras leves en la piel, una vez diluido baja su temperatura a 25 grados aproximadamente, no obstante, el uso de guantes de látex es necesario por lo corrosivo de la solución ya que si se toca directamente con la piel produce picazón moderada a intensa en piel delicada, otra medida importante es el uso de mascara antigases ya que el NaOH al ser diluida despide vapor de agua y partículas de NaOH, y finalmente no debe realizarse en lugares con alimentos, bebidas o donde personas estén cerca y puedan tocar la solución.

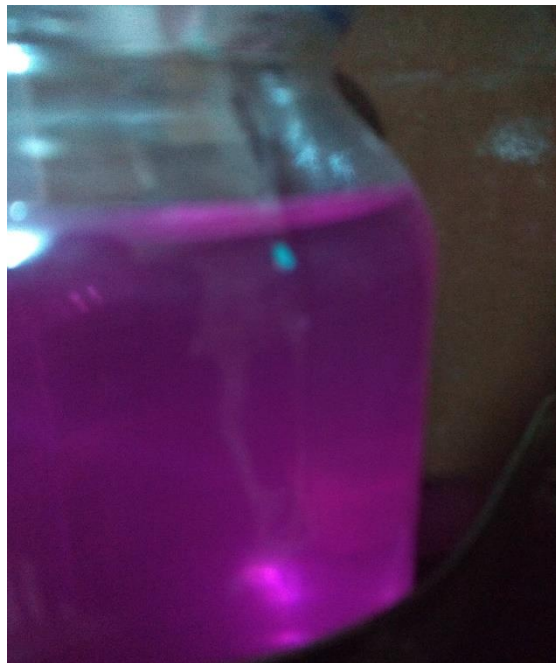


Figura 60 Solución son fenolftaleína

4.3.1 Cambio de coloración

Se introdujo un flujo de 297 ppm de CO_2 al sistema durante 67 min con los dos depósitos conteniendo NaOH y fenolftaleína y la misma medida de color.



Figura 61 Introducción de CO_2

Después de transcurrir los 67 min el color del primer depósito llegó al transparente mientras que el color del segundo depósito disminuyó un mínimo del color original.



Figura 62 Cambio de coloración

Como resultado se obtuvo la gráfica de cambio de color mostrando el tiempo en el que es correcto introducir CO_2 antes de llegar a la curva, también se puede observar el asentamiento de carbonato de sodio en el fondo de los recipientes.

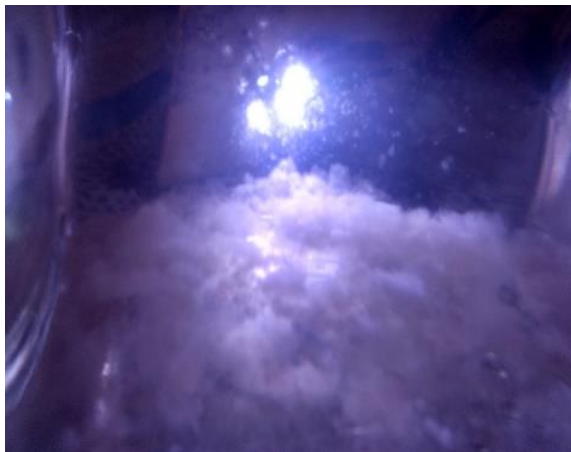


Figura 63 Gráfica de la curva y carbonato de sodio

4.3.2 Cambio de coloración

Inicialmente se probó la medición de color con una sonda de pH para estimar el filtrado de dióxido de carbono la cual cumplió con el objetivo, se calibró utilizando un buffer neutro de pH 7 y un buffer más alto de 14, el problema de usar este sensor es que es muy delicado usarlo en el hidróxido de sodio por un largo periodo de tiempo ya que se daña el bulbo de cristal que contiene para medir el pH, se tienen que calibrar manualmente, por lo que se hizo una gráfica de las mediciones que se realizó para comprobar el filtrado pero se descarta esta forma de medir la capacidad de absorción de dióxido de sodio y se utiliza el sensor de color.

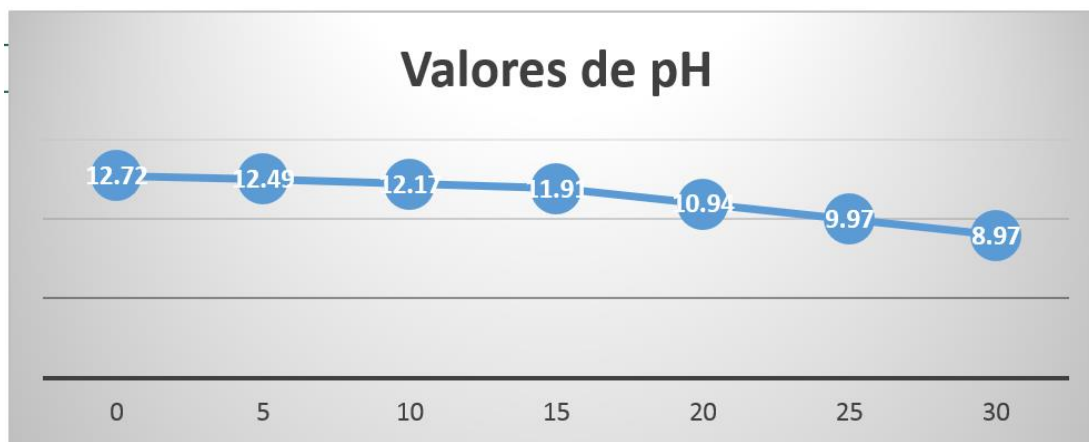


Figura 64 Medición de sonda pH

Los datos obtenidos de del sensor de color se obtuvieron de la tarjeta arduino para guardarlos en un archivo .xlsx y obtener las primeras graficas de las mediciones de los colores rojo, verde y azul en el proceso de absorción introduciendo 167ppm de CO₂:

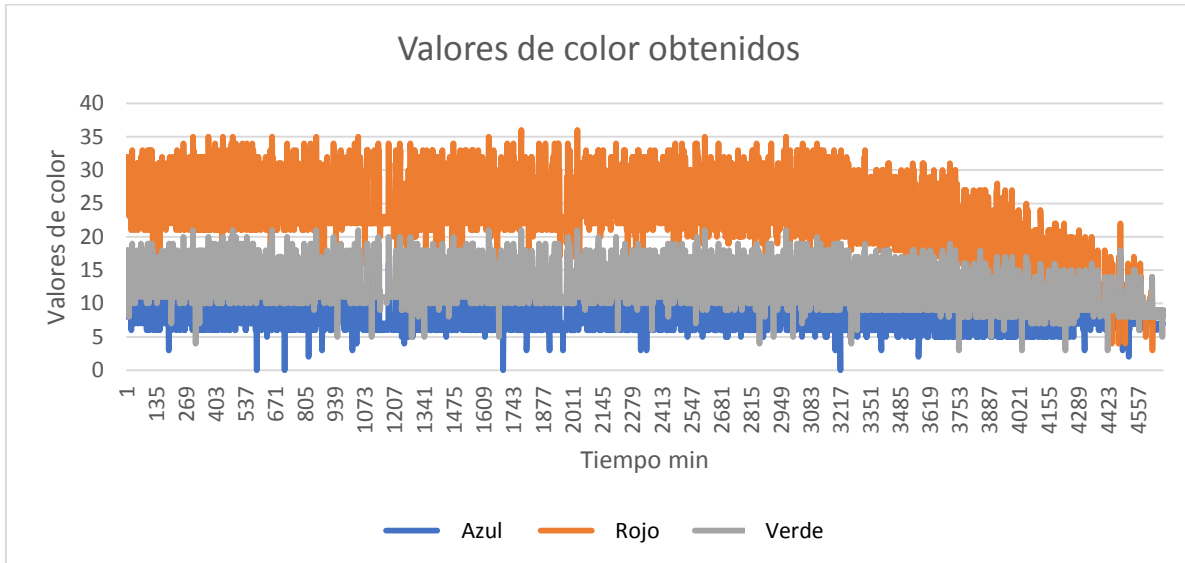


Figura 65 Gráfica en Excel mediciones de color

Debido a que se obtuvieron 4672 datos en 67 min se realizó programación en VBA (visual basic para aplicaciones) para promediar grupos de cinco datos para tener una gráfica más definida y sin ruido y así poder obtener los datos necesarios como la constante de tiempo para poder aplicar el filtro de kalman.

```
Private Sub CommandButton1_Click()
Dim suma As Integer
Dim j As Integer
j = 1
For i = 1 To 940 Step 5
suma = Range("C" & i) + Range("C" & (i + 1)) + Range("C" & (i + 2)) + Range("C" & (i + 3)) + Range("C" & (i + 4))
Range("E" & j).Value = suma
Range("A" & j).Value = suma / 5
j = j + 1
Next i
End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()
Dim suma As Integer
Dim j As Integer
j = 1
For i = 1 To 190 Step 5
suma = Range("A" & i) + Range("A" & (i + 1)) + Range("A" & (i + 2)) + Range("A" & (i + 3)) + Range("A" & (i + 4))
Range("F" & j).Value = suma
Range("G" & j).Value = suma / 5
j = j + 1
Next i
End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()
Dim suma As Integer
Dim j As Integer
j = 1
For i = 1 To 40 Step 5
suma = Range("G" & i) + Range("G" & (i + 1)) + Range("G" & (i + 2)) + Range("G" & (i + 3)) + Range("G" & (i + 4))
Range("H" & j).Value = suma
Range("I" & j).Value = suma / 5
j = j + 1
Next i
End Sub
```

Figura 66 Programación VBA

Obteniendo las gráficas:

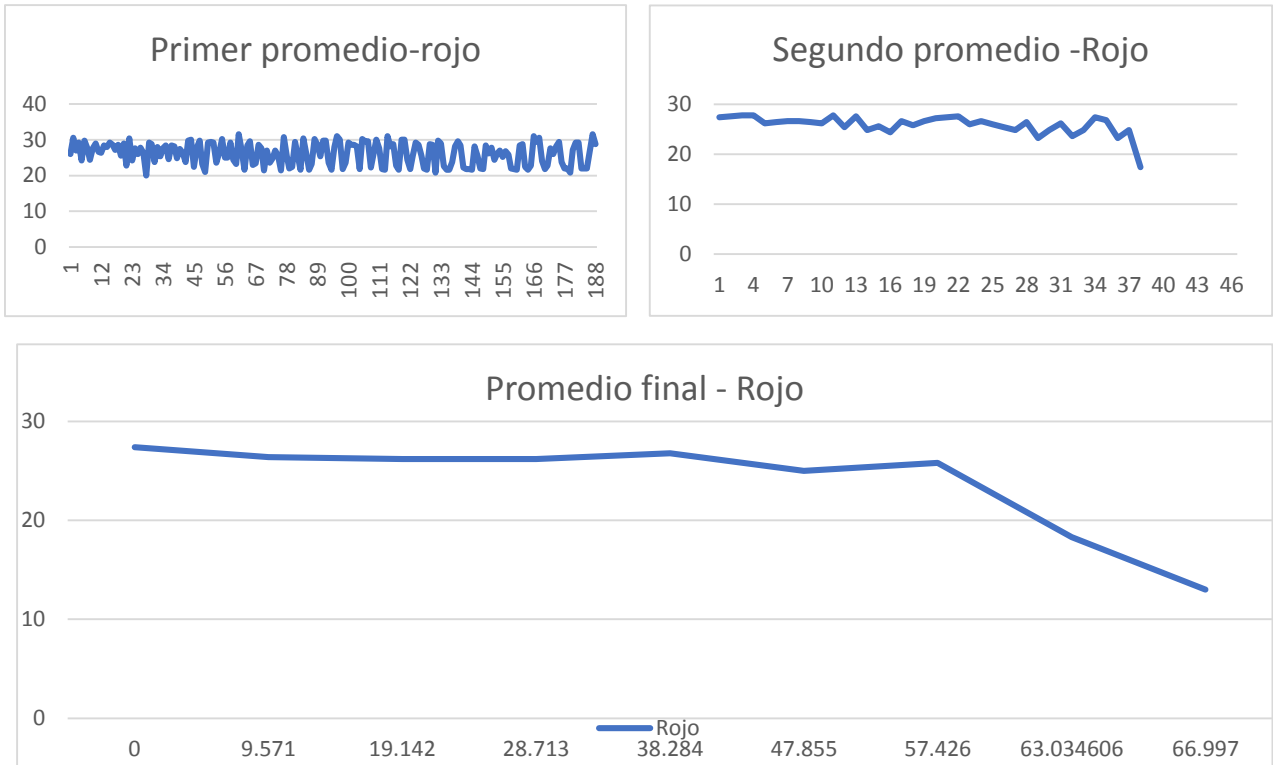


Figura 67 Gráficas de color

Para procesar los datos y aplicar el filtro de kalman el primer paso fue abrir el archivo de Excel en Matlab y analizar los valores de cada columna con histograma para poder observar la distribución.

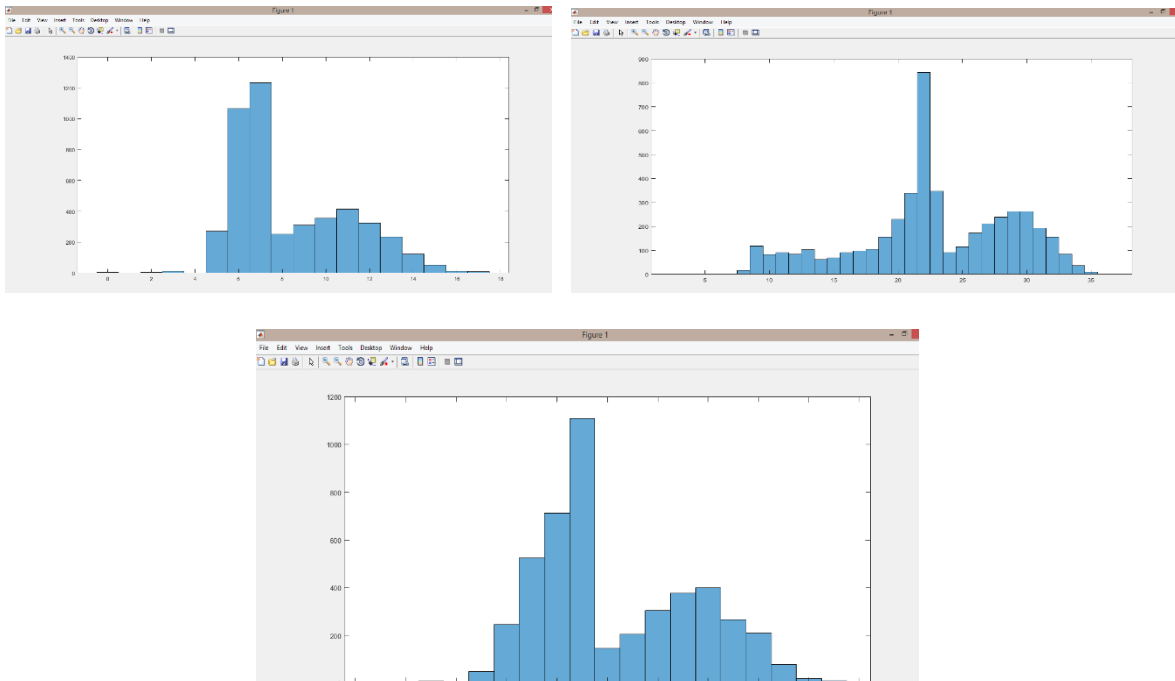


Figura 68 Distribuciones de los datos

Posteriormente se muestran los valores graficado de las tres lecturas dadas por el sensor de color para comenzar con el cálculo de variables necesarias para realizar el algoritmo de kalman.

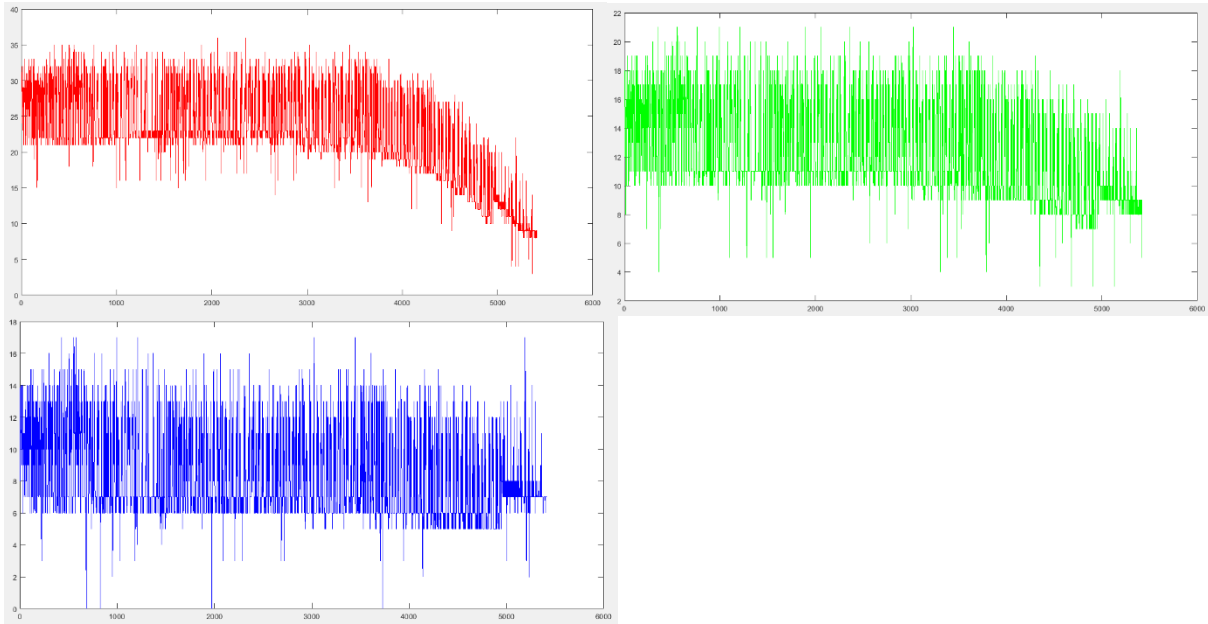


Figura 69 Grafica de cada color

4.3.3 Curva de decoloración

Como se puede observar las mediciones contienen ruido y a pesar que se puede determinar el comportamiento puede reducirse este ruido con un algoritmo de estimación como lo es el filtro de kalman el cual más adelante se aplica a estos datos obtenidos

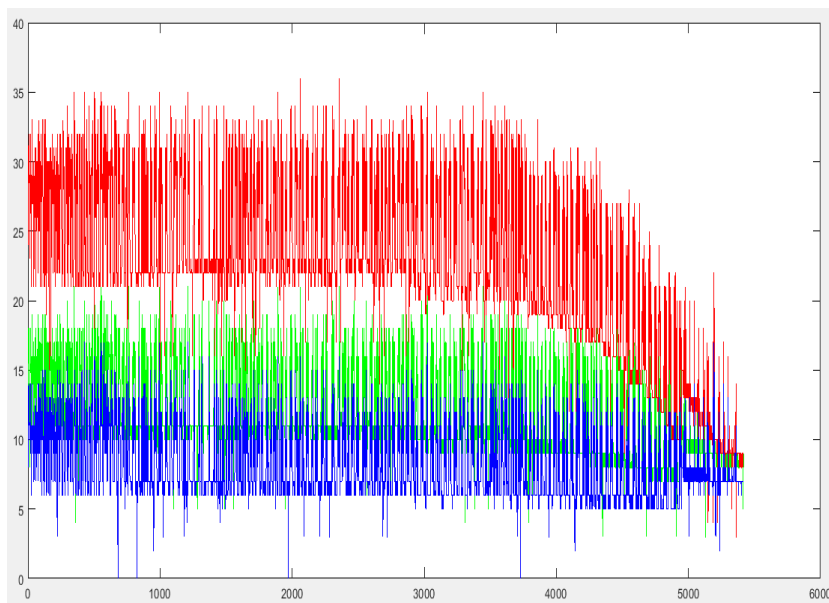
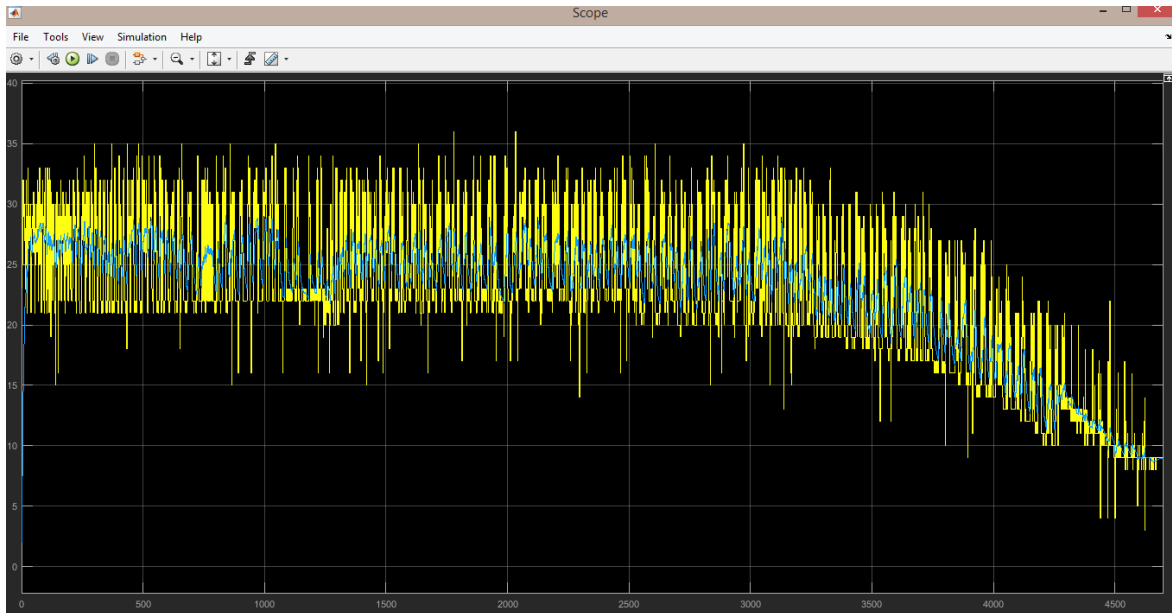


Figura 70 Gráficas de valores realizadas en matlab

Para obtener una curva de degradación de color del proceso de filtrado se aplica el algoritmo de kalman para observar la tendencia de la capacidad de filtrado del hidróxido de sodio con respecto a los valores de pH midiendo el color de la solución que le da la fenolftaleína.



Esta gráfica muestra los datos de los datos de medición en color amarillo y en color azul la señal estimada por la aplicación del algoritmo de kalman, en la siguiente imagen se muestra solo la señal estimada.

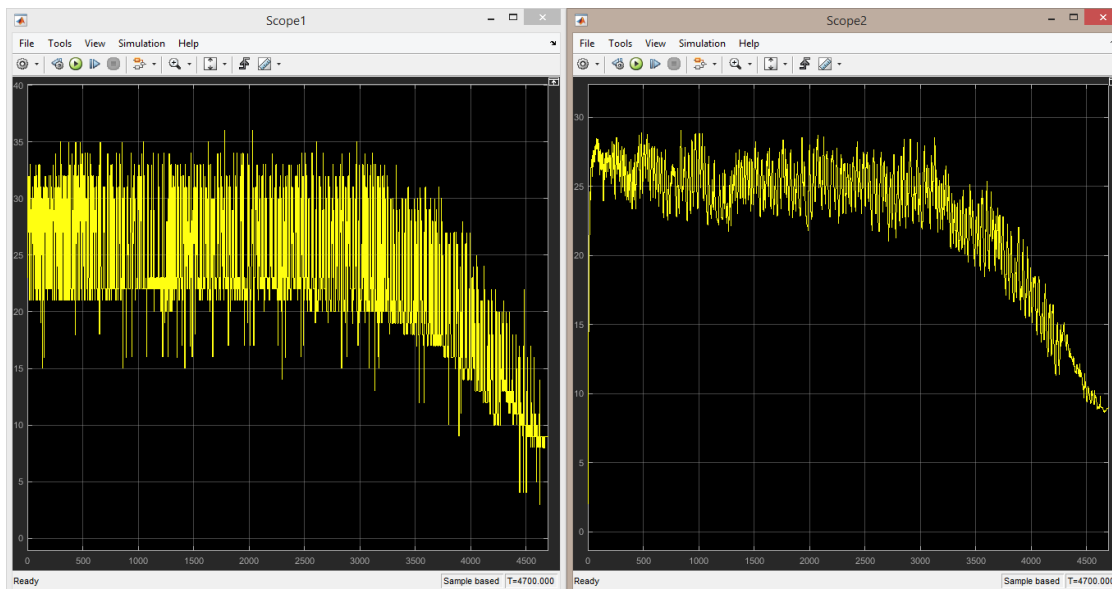


Figura 71 Filtro de kalman

La señal de los datos del color rojo que la que interesa en este proceso de filtrado el que se encuentra en la parte superior y la cual muestra un mayor comportamiento en el filtrado, se puede observar que los otros dos colores se mantienen prácticamente constante, como se puede observar aun contiene ruido lo que indica que se deben tomar medidas para reducirlo ya sea por la curvatura del depósito, la luz del exterior o del mismo sensor, el grosor de las paredes del recipiente, es por eso que se diseñó el segundo depósito para probar si este ruido se reduce como se verá a continuación.

4.4 Experimentación en el segundo depósito

Con el mismo procedimiento de preparación de la solución para filtrado se realizó para las pruebas del segundo diseño en el que se espera obtener mediciones más limpias, los depósitos se llenan por medio de un embudo en el que se le adaptó una conexión de acoplamiento y una parte de manguera de silicón para facilitar el llenado evitando derramar la solución.



Figura 72 Embudo de llenado

Los depósitos son llenados y los sensores instalados para realizar nuevamente con el proceso de filtrado de la misma forma se introdujo un flujo de 297 ppm de CO_2 al sistema durante 65 min con los dos depósitos conteniendo NaOH y fenolftaleína y la misma medida de color.

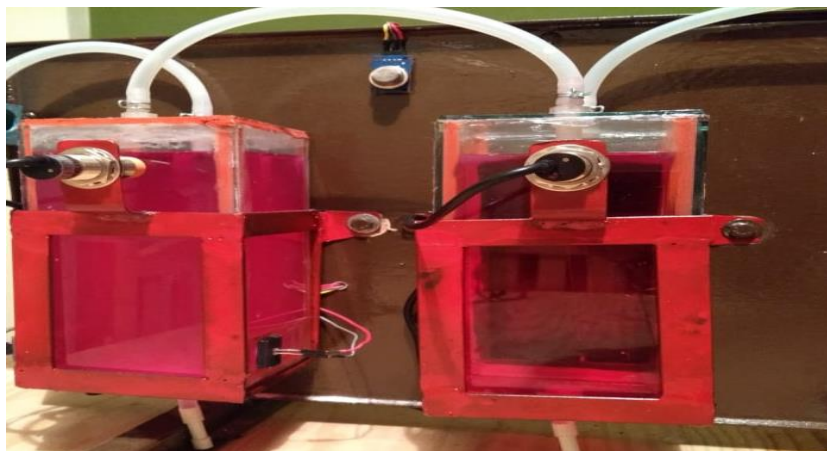


Figura 73 Depósitos llenos de NaOH

4.5 RESULTADOS

Una vez que comienza a fluir dióxido de carbono a través de los depósitos el hidróxido de sodio reacciona con el gas para filtrarlo produciendo bicarbonato de sodio pudiéndose observar estas partículas suspendidas, como puede muestra en la imagen el color magenta comienza a degradarse.



Figura 74 Inicio de decoloración

Hasta finalmente tornarse al transparente lo que indica que el hidróxido de sodio está por finalizar el proceso de filtrado de bicarbonato de sodio, las partículas de carbonato de sodio quedan dispersas en la solución, dando el resultado esperado, conforme reacciona el NaOH con el dióxido de carbono baja el pH lo que hace que el color magenta dado por la fenolftaleína se degrade hasta perder el color lo que indica el pH ha llegado a un valor de 8 indicando que se aproxima al del agua y esto significa que ya la absorción no es la deseada.

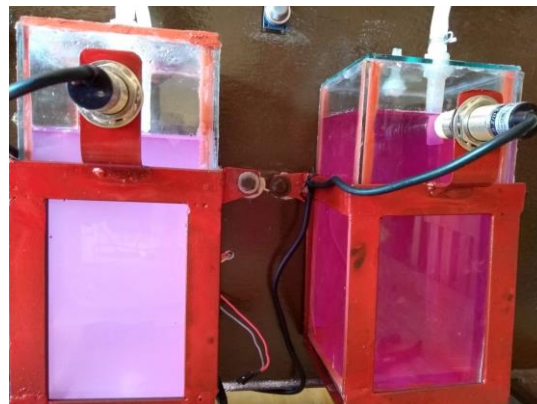


Figura 75 Decoloración

En el fondo puede observarse el bicarbonato de sodio que se forma al hacer la reacción y comienza a concentrarse en el fondo del recipiente por lo que es necesario reemplazar la solución la cual agua y los sedimentos en la parte inferior para un nuevo proceso de filtrado.

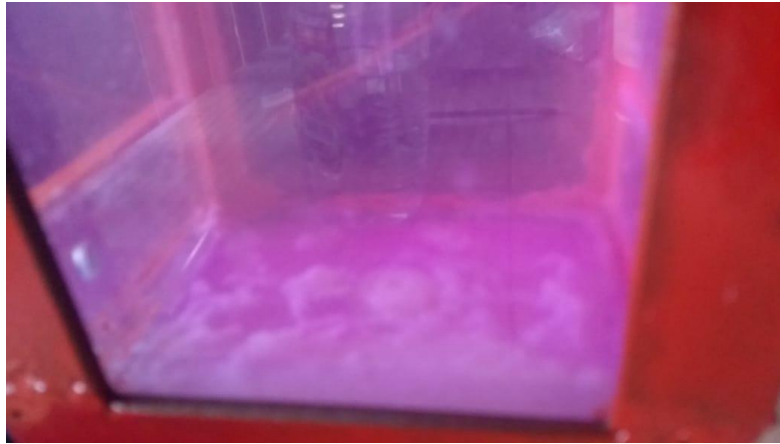


Figura 76 Sedimentación

Nuevamente se grafican los valores aplicando el filtro de kalman observando que la señal es más limpia, comprobando que las medidas para reducir el ruido son correctas y así se puede observar mejor la curva del proceso de filtrado.

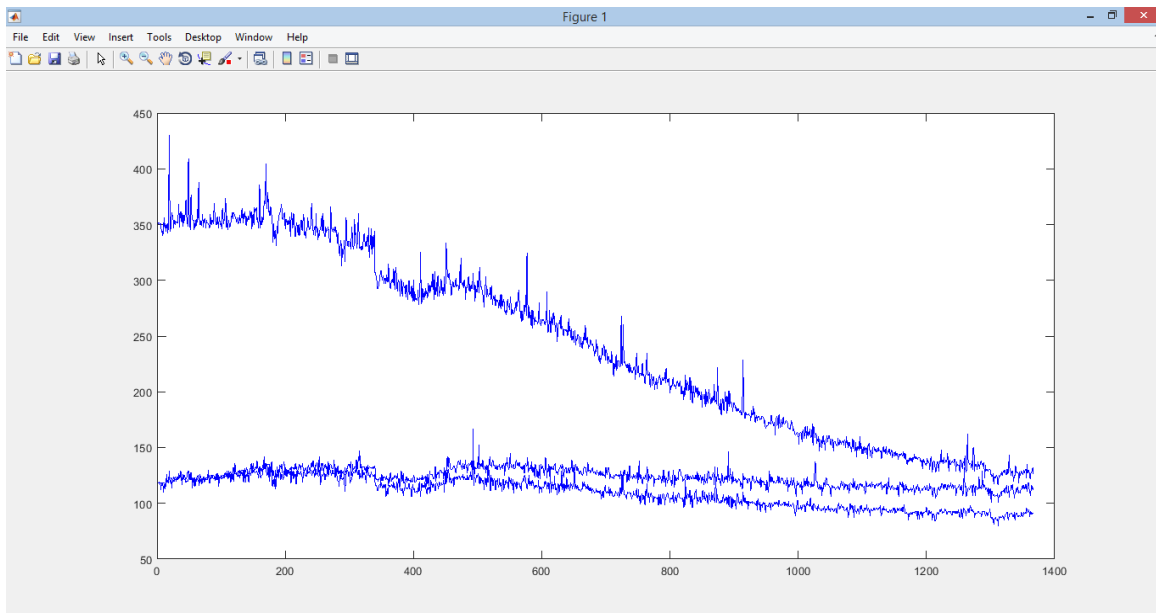


Figura 77 Filtro de kalman

También se llevó a cabo una medición de dióxido de carbono para tener otra forma de comprobar que el sistema filtra dicho gas, se midió la concentración en partes por millón en la entrada y la salida con el sensor MQ 135 (después de haber sido calentado durante 22 horas como lo marca el fabricante) teniendo el comportamiento esperado ya que en la gráfica puede observarse como en la salida las concentración de dióxido de carbono son bajas menos de 50 ppm y conforme transcurre el proceso esta concentración llega alrededor de 90 ppm siendo baja en comparación de la entrada que la cual ronda en los 300 ppm.

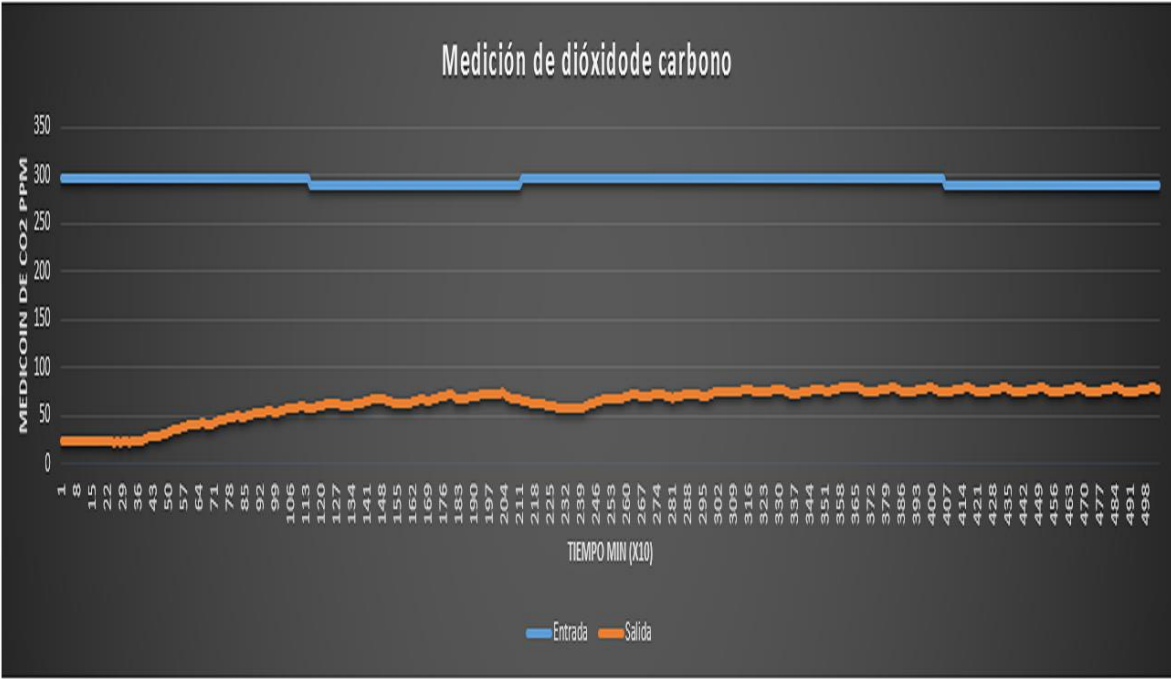


Figura 78 Mediciones de dióxido de carbono

El proceso de filtrado puede observarse mediante la interfaz gráfica diseñada, el comportamiento de la gráfica representa los datos de la medición del color de la solución lo que indica cómo va reduciendo el pH indicando así como se desarrolla el proceso de filtrado. La parte constante indica que el pH está arriba de 10 ya que el NaOH tiene un pH de 13, cuando llega al valor de 10 comienza a bajar lo que representa la curva y finalmente la parte recta inferior indica que se llegó al valor de 8 donde ya no existe coloración magenta, sin embargo, aún existe absorción de CO_2 pero en menor cantidad lo cual ya no es deseable.

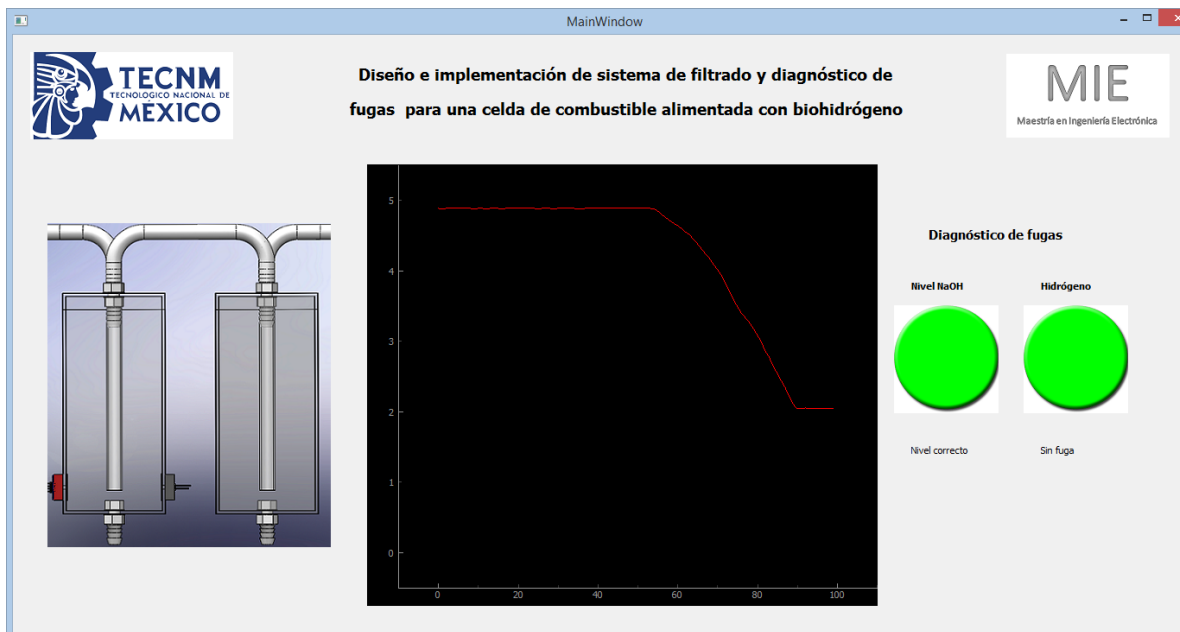


Figura 79 Interfaz gráfica

CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto es el diseñar e implementar un sistema que capture el dióxido de carbono contenido en el biohidrógeno principalmente para poder ser utilizado en la generación de energía eléctrica por medio de una celda de combustible tipo PEM, además de diseñar un sistema que reconociera una fuga ya sea de hidróxido de sodio o de gas como medida de seguridad aplicando los conocimientos adquiridos en el campo de la electrónica.

Inicialmente se investigaron diferentes formas de capturar o filtrar CO₂ como los que se mencionan en el estado del arte y en general todos cumplen su objetivo, la diferencia es la implementación de algunos es más compleja o está fuera de nuestra área de estudio como son las microalgas, el reformado, etc. Pero todos estos métodos tienen un porcentaje de absorción de dióxido de carbono bastante aceptable.

El trabajo presentado en este documento se concluye que cumple con las necesidades requeridas, ya que se comprobó por dos medios que el hidróxido de sodio absorbe favorablemente el dióxido de sodio, estos métodos son: por un lado la medición de dióxido de carbono directamente por medio de un sensor electrónico a través de una tarjeta arduino pudiendo observar la eficiencia del sistema y por otro lado la absorción de dióxido de carbono se comprobó por medio de la medición de los valores de pH utilizando fenolftaleína y un sensor de color obteniendo así el resultado de que se absorbe CO₂ y teniendo una noción de la cantidad absorbida además de tener la gráfica de cómo se va desarrollando el proceso de filtrado.

Y por otro lado el diagnóstico de fugas también cumple su objetivo al ser capaz de reconocer una fuga o las dos de las antes mencionadas y mostrarlo en la interfaz gráfica lo que confirma que la electrónica se puede implementar en cualquier campo para mejorar un proceso como ya se han hecho en otros trabajos.

TRABAJOS FUTUROS

Debido al estudio y los experimentos realizados en esta tesis resultaron varias incógnitas de proyectos que pueden ser desarrollados más adelante para mejorar el sistema.

Por ejemplo se mide el pH utilizando colorimetría, pero otra forma de medirlo puede ser el uso o la aplicación de la turbidimetría la cual es el proceso de medir la pérdida en la intensidad de la luz que atraviesa una solución debido a la dispersión de partículas suspendidas en ella, y es que durante el proceso de filtrado se produce bicarbonato de sodio el cual queda suspendido en la solución y también se acumula en el fondo del recipiente, de esta forma, podría estimarse el pH con respecto a la intensidad de la luz que permita la cantidad de partículas de bicarbonato de sodio conforme se desarrolla el proceso de filtrado.

Además de desarrollar un sistema de medición de dióxido de carbono más preciso y que no requiera de un largo tiempo de calentamiento o constante calibración para determinar exactamente la cantidad de gas en la salida por medio de la aplicación de luz infrarroja y una foto resistencia de la misma longitud de onda la cual es de $4.26 \mu\text{m}$, el obstáculo es encontrar el filtro que se requiere para dicha longitud de onda o en general aplicación de un sensor de NDIR (sensor infrarrojo no dispersivo).

REFERENCIAS

- [1] Fei Gao, Benjamin Blunier, Abdellatif Miraoui “Proton Exchange Membrane Fuel Cells Modeling”, First published 2012 in Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Bibian Hoyos, Natalia Munera, Farid Chejne, “TOLERANCIA AL CO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE”, Escuela de Procesos y Energía, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- [3] Rita Cecilia Ferrer Vega, Guillermo Urriolagoitia Sosa, Christropher René Torres San Miguel y Rafael Rodríguez Martínez, “Propuesta para eliminar monóxido de carbón utilizando un filtro elaborado con zeolita natural”, Instituto Politécnico Nacional - SEPI ESIME Zacatenco.
- [4] Chi-Neng Lin, Shu-YiiWu, Kuo-Shing Lee, Ping-Jei Lin, Chiu-Yue Lin, Jo-Shu Chang, “Integration of fermentative hydrogen process and fuel cell for on-line electricity generation”, Department of Chemical Engineering, Feng Chia University, Taichung, Taiwan.
- [5] Juan Wei, Zuo-Tao Liu, Xin Zhang, “Biohydrogen production from starch wastewater and application in fuel cell”, Department of Chemistry, Shantou University, Guangdong, China.
- [6] Zhien Zhang, Feng Chen, Mashallah Rezakazemi, Wenxiang Zhang, Cunfang Lu, Haixing Chang, Xuejun Quan, “Modeling of a CO₂-Piperazine-Membrane Absorption System”, School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China.
- [7] AliTaghvaieNakhjiri, AmirHeydarinasab, OmidBakhtiari, Toraj Mohammadi, “The effect of membrane pores wettability on CO₂ removal from CO₂/CH₄ gaseous mixture using NaOH, MEA and TEA liquid absorbents in hollow fiber membrane contactor”, Department of Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- [8] Manuel Krauß, Roland Rzehak, “Reactive absorption of CO₂ in NaOH: An Euler-Euler simulation study”, Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf, Institute of Fluid Dynamics.

[9] Manuel Krauß, Roland Rzehak, "Reactive absorption of CO₂ in NaOH: Detailed study of enhancement factor models", Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf, Institute of Fluid Dynamics.

[10] Shengchang Xiang, "Microporous metal-organic framework with potential for carbon dioxide capture at ambient conditions", Fujian Provincial Key Laboratory of Polymer Materials, 2012.

[11] Betzabet Morero, "Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás", Universidad Nacional del Litoral, Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, 2013.

[12] González Sanz, Álvaro, "Limpieza de Biogás en Fotobiorreactores de Microalgas y Bacterias", Universidad de Valladolid escuela de ingenierías industriales, 2015.

[13] Texas Advanced Optoelectronic Solutions, "TCS3200, TCS3210 PROGRAMMABLE COLOR LIGHT TO-FREQUENCY CONVERTER", TAOS099A – august 2011.

[14] Francisco Acuña Garrido, Ventura Muñoz Yi, "Celdas de combustible. Una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto con el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo XXI", Ingeniería y Desarrollo, núm. 10, 2001, pp. 94-104 Universidad del Norte Barranquilla, Colombia.

[15] *Ulises Cano Castillo*, "Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica", Grupo de electroquímica y corrosión del instituto de investigaciones eléctricas.

[16] J.L.G^a Fierro, "Celdas de combustible", Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC, Madrid.

[17] Ramiro Andrés Astudillo bastidas, David Cando, Mg." Diseño e implementación de un prototipo de medidor de nivel de agua a través de un sensor ultrasónico para pasos deprimidos", UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL, 2016.

[18] Mario Israel Hidalgo Cajas, Eduardo Sánchez, msc. "Desarrollo e implementación de un sistema retroalimentado de control de nivel de líquidos con alimentación continua y variable", UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, 2012.

- [19] Oscar Alejandro García Gómez, Miguel Ángel Molina Barrera, “Prototipo de un sensor de nivel láser para tanques atmosféricos”, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2016.
- [20] María Luisa Aguayo López, “Nuevas estrategias para sensores ópticos de dióxido de carbono gas”, UNIVERSIDAD DE GRANADA, 2017.
- [21] Antonio Blanco, Absorción de CO₂ en columna de burbujeo por reacción con álcalis”, Grupos PF&PT y Eco-eficiencia. Departamento de Ingeniería Química-ETSE. Universidad de Santiago de Compostela, 2009.
- [22] JUAN E. TIBAQUIRÁ G., JONATHAN D. POSNER, “Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico.”, Scientia et Technica Año XV, No 42 Agosto de 2009. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [23] Sergio Andrés Blanco Londoño I.C., “Producción de biohidrógeno a través de la fermentación oscura de residuos – Revisión crítica”, Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola Bogotá, Colombia 2013.
- [24] S. Venkata Mohan, “Biohydrogen Production An Introduction”, CSIR–Indian Institute of Chemical Technology, Hyderabad, India.
- [25] Pengyan Wu, “Carbon dioxide capture and efficient fixation in a dynamic porous coordination polymer”, School of Chemistry and Materials Science, 2019.
- [26] Javier Gonzáles, Carlos Sánchez, Bibian Hoyos, Carlos Monsalve, Gonzalo Trujillo, “Oxidación de H₂ y CO en una celda de combustible con ánodo de platino-estaño”, revista ingeniería e investigación No. 55, septiembre 2004.
- [27] Félix Marco Millán, “Diseño e implementación de un sistema de medida de gases con Arduino”, Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, 2016
- [28] Pao Chi Chen, “Capture of CO₂ from coal-fired power plant with NaOH solution in a continuous pilot-scale bubble-column scrubber”, Lunghwa University of Science of Technology Taiwan Power Company, 2014.
- [28] Marta Pérez Martínez, M^aJosé Cuesta Santianes, Sylvia Núñez Crespí, Juan Antonio Cabrera Jiménez “Utilización de biogás en pilas de combustible”.

- [29] David Freifelder, "Técnicas de bioquímica y biología molecular", Editorial Reverté,S.A. abril 2003.
- [30] Glenn H. Brown,"Química cuantitativa", Editorial Reverté, S. A. 1977.
- [31] Robert W. Parry,"Química, Fundamentos experimentales", Editorial Reverté, S. A. 1973.
- [32] Alan G. Sharpe, "Química inorgánica", Editorial Reverté, S. A. 1993.
- [33] Ana Beatriz Picado,"Química I, introducción al estudio de la materia" , Editorial EUNED, 2008.
- [34] Antonio H. Donante, "Principios de electricidad y electrónica", Tomo V, Editorial Marcombo, 2009.
- [35] Leonel G. Corona, "Sensores y actuadores, aplicación con arduino", Grupo editorial Patria, 2014.
- [36] Ramón P. Areny, "Sensores y acondicionadores de señal", 4a edicion, Editorial Marcombo, 2003.