



S.E.P.

S.E.S

Tec.N.M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“DISPOSITIVO PARA LA EVALUACIÓN *IN SITU*
DE CH₄, CO₂, O₂, NH₃, pH
Y TEMPERATURA EN SEDIMENTOS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

M.I.E. FÉLIX FERNANDO DE HOYOS VÁZQUEZ

No. CONTROL 1528D0013

DIRECTORA:

DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN

CO-DIRECTORA:

DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

**DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.**

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "Dispositivo para la Evaluación in situ de CH₄, CO₂, O₂, NH₃, H₂S, pH y temperatura en sedimentos", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctor en Ciencias Ambientales presenta el C. Félix Fernando de Hoyos Vázquez, con número de control 1528D0013 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad necesario para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE



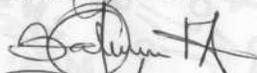
DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN
DIRECTORA DE TESIS



DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ
REVISOR



DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL
CO DIRECTORA DE TESIS



DR. NICOLÁS FLORES ÁLAMO
REVISOR



DR. ARTURO COLÍN CRUZ
REVISOR



DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ MAÑÓN
REVISORA



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JLGR/magj



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx





Metepec, Edo. de México, 28/noviembre/2018

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-1270/2018.

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

**C. FÉLIX FERNANDO DE HOYOS VÁZQUEZ
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T E.**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado "Dispositivo para la Evaluación in situ de CH₄, CO₂, O₂, NH₃, H₂S, pH y temperatura en sedimentos", la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

A T E N T A M E N T E

Exhaustión, Integridad y Honor.

**DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
E INVESTIGACIÓN

JLGR/magj



Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México.
Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmutador: 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



DEDICATORIA

A MI ESPOSA ANGELICA MARÍA

A MIS HIJOS FELIX, CRISTIAN Y ANGELICA

A MIS PADRES PABLO (†) Y Ma. GUADALUPE

A MIS HERMANOS PABLO, MARLA Y ERIKA

AGRADECIMIENTOS

A Dios antes que nada ya que con su divina providencia todo se puede.

Agradezco por la colaboración en este trabajo:

Al Instituto Tecnológico de Toluca y al Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental de la misma institución por las instalaciones brindadas para la realización de esta investigación.

Al Instituto Tecnológico de Piedras Negras, por haberme permitido los estudios de doctorado, a sus directivos y personal que me han brindado todo su apoyo incondicional.

Al Tecnológico Nacional de México, por haberme permitido realizar los estudios de doctorado y por los fondos destinados para la investigación con el número de proyecto 5891.16-P.

Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por la beca otorgada para la realización de los estudios de doctorado.

A mi Directora de Tesis: Dra. María del Carmen Carreño de León por haberme permitido participar en este proyecto e incorporarme a su grupo de trabajo, por sus sugerencias y observaciones, las facilidades que me fueron otorgadas y su amistad.

A la Dra. María del Consuelo Hernández Berriel, Dr. Isaías de la Rosa Gómez, Dra. María de Consuelo Mañón Salas, Dr. Arturo Colín Cruz y al Dr. Nicolás Flores Álamo, por su atenta lectura, el aporte de sus conocimientos, experiencias y comentarios que sirvieron de guía en mi labor científica y personal.

A la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Azcapotzalco, en especial a la Dra. Alethia Vázquez y a la M en C. Xóchilt Quecholac, por las facilidades otorgadas para el análisis de gases en su laboratorio, sus consejos y comentarios que aportaron mucho a esta investigación.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMICH), en especial al Dr. Otoniel Buenrostro Delgado, por las facilidades prestadas con el equipo de mediciones de gases portátil, gases de calibración, sus consejos y su amistad.

A mis amigos y compañeros de posgrado Edgar, Isaac, Ismael, Juan, Julio, Enrique, Luis, Laura, Elvira, Aiza, Jesús, Alfredo, Rodrigo, Perfecto, Betty, Martita, por su amistad y apoyo durante todo este tiempo.

A mi esposa Angélica y a mis hijos Félix, Cristian y Angélica, por su amor, apoyo, paciencia y comprensión.

A mis padres Pablo y Lupana por todo lo que me han dado y enseñado con su ejemplo y amor, a mis hermanos Pablo, Marla y Erika por su amor y apoyo incondicional.

A mis cuñados Pablo y Paty, y mi sobrino Carlitos por su compañía y apoyo incondicional.

A todos los que de una manera directa e indirecta me apoyaron a lo largo del tiempo a concluir esta investigación.

RESUMEN

En México actualmente el 72.23% del agua presenta algún grado de contaminación y va en aumento, debido tanto a la sobrepoblación y la mala planeación de los asentamientos humanos alrededor de los cuerpos de agua más importantes del país (ríos, lagunas, lagos, presas y humedales), obliga a hacer estudios más frecuentes del impacto ambiental no solo en el agua, en los sedimentos, que es donde queda finalmente el registro de los contaminantes, tales como materia orgánica en descomposición, iones en solución, entre otros. También se requieren de estudios para determinar su grado de afectación, en su caso verificar los avances en campañas de remediación, así como en la elaboración de inventarios de gases de efecto invernadero (GEI).

En esta investigación se diseñó y desarrolló un equipo de medición *in situ* de los siguientes parámetros: CH₄, CO₂, O₂ disuelto, NH₃, pH y temperatura en sedimentos.

Las características del equipo establecidas en el estudio de factibilidad, técnico y experimentación son: volumen de muestra de sedimentos hasta 194 mL, pH de 0 a 14 ± 0.01 , temperatura de -15 a $60^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$, CH₄ de 0 a 20% V/V $\pm 0.5\%$, de concentración, CO₂ de 0 a 20% V/V $\pm 0.11\%$, de concentración, NH₃ de 0 a 25 ppm, O₂ de 0 a 25% V/V $\pm 0.01\%$, de concentración.

Con el dispositivo se pueden realizar estudios en el análisis y cuantificación de gases en degradación de la materia orgánica *in situ*, en grados de afectación o remediación en cuerpos de agua contaminados con descargas aguas municipales, rellenos sanitarios, elaboración de composta, entre otros, a muy bajo costo, tanto en lo económico como en ahorro de tiempo; con estas ventajas se pueden realizar varios muestreos para que los resultados sean más apegados a la realidad.

ABSTRACT

In Mexico currently 72.23% of the water presents some degree of pollution and is increasing, due both to the overpopulation and poor planning of human settlements around the most important bodies of water in the country (rivers, lagoons, lakes, dams and wetlands), requires more frequent studies of the environmental impact not only in the water, in the sediments, which is where the registration of pollutants is finally, such as organic matter in decomposition, ions in solution, among others. Studies are also required to determine their degree of affectation, if necessary verify progress in remediation campaigns, as well as in the preparation of greenhouse gas (GHG) inventories.

In this research, an *in situ* measurement equipment was designed and developed for the following parameters: CH₄, CO₂, dissolved O₂, NH₃, pH and temperature in sediments.

The characteristics of the equipment were established according to the feasibility and technical study: volume of sediment sample up to 194 mL. pH from 0 to 14 ± 0.01, temperature from -15 to 60 ° C ± 0.05 ° C, CH₄ from 0 to 20% V/V ± 0.5%, concentration, CO₂ from 0 to 20% V / V ± 0.11%, concentration, NH₃ from 0 to 25 ppm, O₂ from 0 to 25% V/V ± 0.01%, concentration.

With the one of device will be able to realize studies where it is required to analyze the degradation of the organic matter *in situ*, of affectation or remediation in bodies of water contaminated with discharges municipal waters, landfills, elaboration of compost, among others, to very low cost, so much in the economic as in time saving. With these advantages, more samplings can be made so that the results are closer to reality.

ÍNDICE

| | |
|---|--------------|
| RESUMEN | vii |
| ABSTRACT | viii |
| ÍNDICE | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiii |
| ÍNDICE DE TABLAS | xviii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1 FUNDAMENTOS | 3 |
| 1.1 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) | 3 |
| 1.1.1 Inventario de emisiones de GEI | 3 |
| 1.1.2 Inventarios en emisiones de GEI en sedimentos | 4 |
| 1.2 SEDIMENTOS | 5 |
| 1.2.1 Contaminación en sedimentos | 6 |
| 1.2.2 Dispositivos usados en el Muestreo de sedimentos | 6 |
| 1.3 EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN UTILIZADO PARA MEDICIONES <i>IN SITU</i> | 9 |
| 1.4 SENSORES | 11 |
| 1.4.1 Sensores de Gases | 11 |
| 1.4.2 Sensor de Gases Por Absorción Infrarroja No Dispersiva (NDIR) | 12 |
| 1.4.3 Ecuación Ideal de Lambert-Beer para absorción de gas NDIR | 14 |
| 1.4.4 Ecuación ideal de Lambert-Beer modificada | 17 |
| 1.4.5 Efectos de la temperatura ambiental en el sensor NDIR | 20 |
| 1.4.6 Conceptos para la selección de filtros para luz IR | 21 |
| 1.4.7 Detectores termopilas NDIR TS4x200B-A-S1.5-2-Kr-D2 /E1/ 3357/ 10350 y Fuente de luz Infrarroja JSIR350-4-AL-R- D6.0-0-0 | 23 |
| 1.4.8 Sensor de Oxígeno (O ₂) UV Flux OX-0052 | 28 |
| 1.4.9 Sensor de pH | 29 |

| | | |
|--------|--|----|
| 1.4.10 | Sensor de temperatura (Termistor NTC) | 33 |
| 1.4.11 | Sensor de presión MP3V5010DP | 35 |
| 1.5 | MEDICIÓN DE VOLUMEN POR PRESIÓN Y TEMPERATURA | 36 |
| 1.6 | ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL | 37 |
| 1.6.1 | Amplificador operación de precisión | 38 |
| 1.6.2 | Acondicionador de señal para aplicaciones de sensores NDIR | 38 |
| 1.7 | ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO | 39 |
| 1.7.1 | Convertidor Analógico a Digital ADS1115 | 39 |
| 1.7.2 | Procesamiento de datos con módulo de desarrollo MSP430F5529 | 40 |
| 1.7.3 | Procesamiento de datos con Raspberry Pi 3 | 41 |
| 1.7.4 | Sistema operativo Windows IOT y programación XAML y C# | 41 |
| 1.7.5 | | 16 |
| 1.8 | Procesamiento de datos con módulo de desarrollo MSP430F5529 | 16 |
| 2 | PARTE EXPERIMENTAL | 43 |
| 2.1 | Definición de Requerimientos | 45 |
| 2.2 | Estudio de Mercado | 45 |
| 2.3 | Estudio Económico | 45 |
| 2.4 | Estudio Técnico de Factibilidad | 45 |
| 2.5 | Diseño del prototipo (Sonda) | 46 |
| 2.6 | Selección y prueba de sensores | 46 |
| 2.7 | Acondicionamiento de señales | 47 |
| 2.8 | Adquisición de datos | 47 |
| 2.9 | Calibración con forme a las Normas y especificaciones | 47 |
| 2.10 | Desarrollo del modelo para la evaluación de datos | 48 |
| 2.11 | Validación y verificación Implementación de mejoras | 48 |
| 2.12 | Implementación de mejoras | 48 |

| | |
|--|------------|
| 3 RESULTADOS Y DISCUSIONES PARCIALES | 49 |
| 3.1 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS | 49 |
| 3.2 ESTUDIO DE MERCADO | 49 |
| 3.3 ESTUDIO ECONÓMICO | 52 |
| 3.4 ESTUDIO TÉCNICO DE FACTIBILIDAD | 52 |
| 3.4.1 Estudio de Mecánica del sedimento | 53 |
| 3.2.2 Extracción y medición de gases de sedimentos del Rio Lerma | 58 |
| 3.5 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA SONDA (MUESTREADOR) | 65 |
| 3.5.1 Cálculo de volumen de muestra | 66 |
| 3.6 DISEÑO Y DESARROLLO DE MULTI SENSOR DE GASES CH₄, CO₂ Y NH₃ | 67 |
| 3.6.1 Determinación de anchos de banda para la selección de filtros | 68 |
| 3.6.2 Diseño del Sensor | 69 |
| 3.7 DISEÑO DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN DE GASES Y CIRCULACIÓN | 74 |
| 3.8 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES SE SENSORES DE TEMPERATURA, pH Y SENSORES DE GASES | 77 |
| 3.8.1 Acondicionamiento de señal para sensor de temperatura | 77 |
| 3.8.2 Acondicionamiento de señal para sensor de pH | 90 |
| 3.8.3 Acondicionador de señales del multi sensor de gases CH₄, CO₃ y NH₃ | 96 |
| 3.9 ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE DATOS (ALGORITMOS DE PROGRAMACIÓN PARA CALIBRACIÓN Y OPERACIÓN) | 106 |
| 3.9.1 Algoritmo de Calibración y medición para sensor de temperatura | 107 |
| 3.9.2 Algoritmos de calibración y medición del sensor de pH | 111 |
| 3.9.3 Algoritmo de programación para el multi sensor de gases para el Microcontrolador MSP430F5529 | 112 |

| | |
|--|-----|
| 3.9.4 Diseño del algoritmo para la medición del volumen en el sistema de extracción de gases del <i>InSite 100</i> , en los modos abierto y cerrado (recirculación). | 119 |
| 3.10 INTEGRACIÓN DEL HARDWARE | 128 |
| 3.10.1 Desarrollo de software para medición y calibración de datos | 130 |
| 3.11 VALIDACIÓN DE LA CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN DE LOS SENSORES | 134 |
| 3.11.1 Pruebas y validación del multi sensor y primera etapa, con el algoritmo de Lambert-Beer | 134 |
| CONCLUSIONES | 138 |
| REFERENCIAS | 140 |
| ANEXOS | 150 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 1.1 Distribución de GEI México, 2010 | 4 |
| Figura 1.2 Muestreador tipo draga Ekkman | 7 |
| Figura 1.3 Muestreadores a) Shipek y b) Ponar | 8 |
| Figura 1.4 Muestreador tipo núcleo | 9 |
| Figura 1.5 Principio de operación de un sensor NDIR | 12 |
| Figura 1.6 Absorbancia típica para $kl = 4.5, 10, 25, 50, 115$ | 15 |
| Figura 1.7 Longitud de onda | 21 |
| Figura 1.8 Ancho de banda | 22 |
| Figura 1.9 Espectro IR del metano | 22 |
| Figura 1.10 Detectores termopilas (a) y Fuente de IR (b) | 23 |
| Figura 1.11 Características del encapsulado TO39 modificado y orden de patillaje | 25 |
| Figura 1.12 Circuito eléctrico equivalente del detector TS4x200B-A-S1.5-2-Kr-D2 /E1/ 3357/ 10350 | 26 |
| Figura 1.13 Características del encapsulado TO39 modificado para la fuente de IR y orden de patillaje | 27 |
| Figura 1.14 Gráficas de porcentaje de emisividad (a) y distribución de radiación angular (b) | 28 |
| Figura 1.15 Sensor de Oxígeno UV Flux OX-0052 | 29 |
| Figura 1.16 Relación mV-pH en función de la temperatura | 31 |
| Figura 1.17 Sensor de pH HACH modelo PH77-SS | 32 |
| Figura 1.18 Diferentes tipos de termistores según su aplicación | 33 |
| Figura 1.19 Respuesta del termistor en relación con la temperatura y la resistencia | 34 |
| Figura 1.20 Sensor de Presión MP3V5010DP | 36 |
| Figura 1.21 Amplificador Operacional AD8629-EP | 38 |
| Figura 1.22 Acondicionador de señal para aplicaciones de sensores NDIR Texas Instruments LMP91051 | 39 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 1.23 Convertidor analógico a digital ADS1115 | 40 |
| Figura 1.24 Modulo de desarrollo MSP430F5529LP | 40 |
| Figura 1.25 Raspberry Pi 3 (Raspberry, 2016) | 41 |
| Figura 2.1 Diagrama del Desarrollo Experimental | 43 |
| Figura 3.1 Gráfica de penetraciones por tubo | 56 |
| Figura 3.2 Gráfica de la penetración promedio por tubo | 56 |
| Figura 3.3 Desviación estándar de cada tubo | 57 |
| Figura 3.4 Recipiente de extracción de gases | 59 |
| Figura 3.5 Recipiente de extracción de gases en funcionamiento | 59 |
| Figura 3.6 Tubos de ensayo con las muestras de gases | 60 |
| Figura 3.7 Cromatógrafo de gases Agilent 7890B de la UAM Azcapotzalco | 60 |
| Figura 3.8 Gráficas de los resultados del cromatógrafo del primer experimento AME 2 | 61 |
| Figura 3.9 Gráficas de los resultados del cromatógrafo de extracciones de gases disueltos con ultrasonido | 62 |
| Figura 3.10 Diseño de la sonda (muestreador) | 65 |
| Figura 3.11 Detalle la fabricación de la sonda (muestreador) | 66 |
| Figura 3.12 Cálculo de volumen de la muestra | 66 |
| Figura 3.13 Comparación de los espectros infrarrojos de los gases | 68 |
| Figura 3.14 Detectores y filtros en el mismo encapsulado | 70 |
| Figura 3.15 Fuente de IR | 70 |
| Figura 3.16 Dimensiones del cuerpo del Sensor (en mm), de lado izquierdo dimensiones y del lado derecho detalles del acabado | 71 |
| Figura 3.17 Diseño del Multi sensor NDIR para CH₄, CO₂ y NH₃ | 71 |
| Figura 3.18 Equipo para fabricar sensor y otros accesorios del sistema completo | 72 |
| Figura 3.19 Maquinado de la carcasa del sensor de gases | 72 |
| Figura 3.20 Sensor de gases CH₄, CO₂ y NH₃ ensamblado | 73 |
| Figura 3.21 Diseño del separador de gases | 75 |
| Figura 3.22 Diseño del sistema completo de extracción, Circulación/ recirculación, medición de concentración y volumen de gases | 76 |

| | |
|---|------------|
| Figura 3.23 Diagrama a bloques del Sistema de extracción, Circulación - recirculación y medición de gases | 77 |
| Figura 3.24 Divisor de voltaje para termistor | 78 |
| Figura 3.25 Método para determinar respuesta de temperatura vs. resistencia de termistor | 80 |
| Figura 3.26 Gráfica de curva promedio de temperatura vs resistencia | 83 |
| Figura 3.27 Gráfica y cálculo de formula por regresión logarítmica de 0- 19°C | 84 |
| Figura 3.28 Gráfica y cálculo de formula por regresión logarítmica de 20- 39°C | 86 |
| Figura 3.29 Gráfica y cálculo de formula por regresión logarítmica de 40- 60°C | 88 |
| Figura 3.39 Circuito acondicionador de señal para sensor de pH | 91 |
| Figura 3.31 Respuesta lineal del electrodo de pH | 93 |
| Figura 3.32 Respuesta en Voltaje del electrodo de pH de 0 a 60 °C | 94 |
| Figura 3.33 Acondicionador de señal para cada detector termofílico, G = 214.64 (un circuito para cada canal) | 97 |
| Figura 3.34 Acondicionador de señal para el termistor NTC | 99 |
| Figura 3.34 Circuito completo de los acondicionadores de señal | 99 |
| Figura 3.36 Diseño de circuito impreso (a) y desarrollo del circuito impreso de la primera etapa | 100 |
| Figura 3.37 Montaje del circuito acondicionador de señal primera etapa, en el sensor multigases | 101 |
| Figura 3.38 Circuito de potencia de la fuente de IR JSIR350-5-BL-R-D3.6- 0-0 | 101 |
| Figura 3.39 Respuesta de la primera etapa de acondicionamiento de señal, detectores de CH₄ (línea superior) y referencia (línea inferior) | 102 |
| Figura 3.40 Respuesta de la primera etapa de acondicionamiento de señal, detectores de NH₃ (línea superior) y referencia (línea inferior) | 103 |

| | |
|--|------------|
| Figura 3.41 Respuesta de la primera etapa de acondicionamiento de señal, detectores de CO2 (línea superior) y referencia (línea inferior) | 103 |
| Figura 3.42 Segunda etapa del acondicionador de señal para el sistema de detección de gases CH4, CO2 y NH3 y termistor NTC | 104 |
| Figura 3.43 Diseño del circuito impreso de la segunda etapa | 105 |
| Figura 3.44 Raspberry Pi 3 | 106 |
| Figura 3.45 Algoritmo de programación para calibración del sensor de temperatura | 109 |
| Figura 3.46 Algoritmo de programación para medición de temperatura | 110 |
| Figura 3.47 Algoritmo para calibrar sensor de pH | 111 |
| Figura 3.48 Algoritmo para medición de pH | 112 |
| Figura 3.49 Tiempos para adquisición de valores máximos y mínimos | 113 |
| Figura 3.50 Circuito del termistor NTC | 117 |
| Figura 3.51 Muestreo del termistor y ciclo de la fuente de IR | 118 |
| Figura 3.52 Modo de operación sistema abierto con aire | 120 |
| Figura 3.53 Curvas de Flujo de la bomba DS-PMP-0010 | 121 |
| Figura 3.54 Concentraciones de un gas determinado en función muestreo | 123 |
| Figura 3.55 Algoritmo de programación en modo abierto | 124 |
| Figura 3.56 Modo de operación cerrado o con recirculación con aire | 126 |
| Figura 3.57 Concentraciones de un gas determinado en función muestreo | 126 |
| Figura 3.58 Algoritmo de programación en modo cerrado o de recirculación | 127 |
| Figura 3.59 Fabricación de placas de aluminio | 128 |
| Figura 3.60 Diagrama a bloques del ensamblaje del hardware | 129 |
| Figura 3.61 Integración de componentes en estuche industrial | 129 |
| Figura 3.62 Sistema de procesamiento y adquisición de datos ensamblado | 130 |
| Figura 3.63 Diagrama de flujo del menú principal del sistema in Site 100 | 131 |

| | | |
|--------------------|---|------------|
| Figura 3.64 | Diseño del menú del sistema para Windows Universal | 132 |
| Figura 3.65 | Diseño de la pantalla de medición | 133 |
| Figura 3.66 | Diseño de la pantalla del menú de programación | 133 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-------------------|---|-----------|
| Tabla 1.1 | Tabla comparativa de equipos de medición | 10 |
| Tabla 1.2 | Comparación entre sensores de diferentes tipos de operación | 21 |
| Tabla 1.3 | Características del detector infrarrojo TS4x200B-A-S1.5-2-Kr-D2 /E1/ 3357/ 10350 | 24 |
| Tabla 1.4 | Características de la fuente de IR JSIR350-4-AL-R-D6.0-0-0 | 26 |
| Tabla 3.1 | Especificaciones dispositivo propuesto | 49 |
| Tabla 3.2 | Resultado de la encuesta de factibilidad | 50 |
| Tabla 3.3 | Resultado de la encuesta de factibilidad, nivel de confianza | 51 |
| Tabla 3.4 | Tubos de prueba y celda de carga | 53 |
| Tabla 3.5 | Mediciones en campo para determinación del promedio de penetración y los valores máximos y mínimos | 54 |
| Tabla 3.6 | Tamaño de partículas y clasificación del tipo de sedimento | 57 |
| Tabla 3.7 | Determinación de las relaciones de diluciones por reactor | 63 |
| Tabla 3.8 | Cálculo de los volúmenes de gases generados y disueltos y concentraciones | 64 |
| Tabla 3.9 | Parámetros específicos de los filtros infrarrojos para la detección de gases | 69 |
| Tabla 3.10 | Registro de 3 capturas para determinar valor promedio y error | 81 |
| Tabla 3.11 | Registro de 3 capturas para determinar valor promedio y error (continuación) | 82 |
| Tabla 3.12 | Cálculo del error por grado centígrado y error total por rango de 0 a 19°C | 85 |
| Tabla 3.13 | Cálculo del error por grado centígrado y error total por rango de 19 a 39°C | 87 |

| | |
|---|------------|
| Tabla 3.14 Cálculo del error por grado centígrado y error total por rango de 40 a 60°C | 89 |
| Tabla 3.15 Respuesta del electrodo de pH a 25 °C | 92 |
| Tabla 3.16 Respuesta del electrodo de pH de 0 a 60°C | 94 |
| Tabla 3.17 Desviación por °C en cada ecuación | 95 |
| Tabla 3.18 Voltajes esperados en termistor | 108 |
| Tabla 3.19 Pruebas de rendimiento la batería de ion de litio | 130 |
| Tabla 3.20 Valores para calibración CERO | 135 |
| Tabla 3.21 Valores para calibración SPAN | 135 |
| Tabla 3.22 Respuesta del sensor con gas de prueba para CH₄ y CO₂ | 137 |

INTRODUCCIÓN

Hoy en día a nivel mundial, en cuerpos de agua como ríos, lagunas, lagos y humedales, existen un sin número de contaminantes generados por la actividad humana (descargas residuales municipales e industriales, cambio de uso de suelos, agricultura y ganadería), provocando con el tiempo la acumulación de ellos en los sedimentos, donde generan una serie de problemas: acumulación de metales pesados, Materia Orgánica (MO) en descomposición que genera Gases de Efecto Invernadero (GEI), que emanan a la atmosfera o que quedan atrapados por siglos en sedimento sobre todo en suelos arcillosos (lutita), compuestos altamente tóxicos que reducen o alteran los nutrientes, que a la vez provoca la desaparición de la biodiversidad o la transferencia de ellos desde los microorganismos al ser humano, provocando enfermedades graves en toda la cadena alimenticia, en algunos casos su infiltración hacia los mantos freáticos, distribuyéndose en aguas superficiales alterando y afectando la flora y la fauna que predomina en la zona (INECC, 2013).

La determinación del grado de afectación de ecosistemas o lugares donde se hayan implementado programas de remediación requiere de la cuantificación de compuestos como CH₄, CO₂, NH₃, pH, O₂ disuelto, temperatura, entre otros. El análisis en la mayoría de los casos es costoso, debido a que se requiere de muestreo, conservación de la muestra, traslado, reactivos, insumos, mano de obra calificada, tiempo de realización y equipo especializado (SEMARNAT, 2014; SECOFI, 1995; Abarca, 2007).

Es de gran importancia la determinación más precisa y exacta de los inventarios de GEI, en cuerpos de agua, sobre todo en humedales, donde la mayor parte de la generación y acumulación de ellos se encuentra en el sedimento de tamaño fino y medio (SEMARNAT, 2014).

La cuantificación de GEI que se realiza por medición directa, demandan de inversiones relativamente altas para obtener información confiable sobre los niveles de contaminación existentes (SECOFI, 1995).

El objetivo principal de esta investigación fue diseñar y construir un dispositivo para realizar las mediciones *in situ* de: CH₄, CO₂, O₂ disuelto, NH₃, pH y temperatura en sedimentos en menos tiempo con un costo accesible. Los objetivos específicos fueron:

- 1) Diseñar una sonda para tomar muestras de sedimentos de cuerpos de agua, hasta 1 metro de profundidad en sedimento de tamaño fino y medio, y hasta 4 metros bajo el agua, que permita realizar mediciones *in situ* de: CH₄, CO₂, O₂ disuelto, NH₃, pH y temperatura;
- 2) Seleccionar los materiales adecuados para la construcción de una sonda para tomar muestras de sedimentos en cuerpos de agua;
- 3) Diseñar y construir un sistema de adquisición y procesamiento de datos, con capacidad de realizar estadística básica de los compuestos a medir y almacenamiento para elaborar un inventario de GEI;
- 4) Caracterizar sedimentos en puntos seleccionados de algún cuerpo de agua, mediante técnicas y métodos para CH₄, CO₂, O₂ disuelto, NH₃, pH y temperatura;
- 5) Mejorar el prototipo mediante la implementación de nuevos sensores que posibiliten la realización de mediciones en cuerpos de agua y en la atmósfera.

De este modo en el capítulo 1 se encuentran los antecedentes y los fundamentos que sustentan esta investigación, la problemática de la falta de equipos para medir gases y algunos parámetros fisicoquímicos en sedimentos *in situ*. Los equipos que hay en el mercado y las características técnicas de los componentes electrónicos utilizados.

En el capítulo 2 se describen las etapas experimentales de la presente investigación.

En el capítulo 3 se analizan y discuten los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones y las referencias en las que se basó esta investigación.

1. FUNDAMENTOS

Las bases teóricas que sustentan este trabajo de investigación son las siguientes:

1.1 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

En cuanto a la generación total de emisiones de GEI del mundo, México produce el 1.67% de las mismas, ocupando el 9º lugar. En este sentido, a partir de la adhesión a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el país ha elaborado inventarios nacionales de emisiones GEI con el propósito de identificar y reportar tanto cifras totales como tendencias que permitan tomar decisiones respecto a este tema, sobre todo, en lo referente a acciones y estrategias de reducción de estos contaminantes (SEMARNAT, 2013).

La mayoría de los países se ha comprometido a limitar las emisiones de gases de efecto invernadero de origen humano. Con objeto de determinar con éxito de estos esfuerzos, se tienen que utilizar métodos estandarizados que estimen con exactitud las causas naturales y humanas de gases de efecto invernadero incluyendo el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄) a nivel nacional (G-Science, 2012).

1.1.1 Inventarios de emisiones de GEI

La importancia de integrar inventarios de emisiones GEI estriba en conocer, a través de cálculos y metodologías de cuantificación, las condiciones actuales de cómo se da la concentración de estos gases en la atmósfera, realizar proyecciones acerca de qué ruta seguirá en el futuro y plantear soluciones ante los posibles efectos del cambio climático y el calentamiento de la Tierra sobre las poblaciones humanas y los ecosistemas. De igual manera, los inventarios propician el establecimiento de metas de reducción para los países u organizaciones que los trabajen, además de visualizar qué aspectos son

prioritarios en atención y acción, lo que otorga mayor certeza a las medidas respectivas y los métodos con que deben llevarse a cabo (G-Science, 2012).

En referencia al Inventario Nacional de Emisiones de GEI 2010, el sector de energía genera el 67% de las emisiones nacionales totales, debido al consumo de combustibles fósiles para la producción de energía (SEMARNAT, 2013) (Ver Figura 1.1). Sin embargo, también pueden mencionarse otros sectores importantes como Agricultura, Ganadería, Industria, Residuos y Uso del suelo, cambio del uso del suelo y silvicultura (USCUSS).

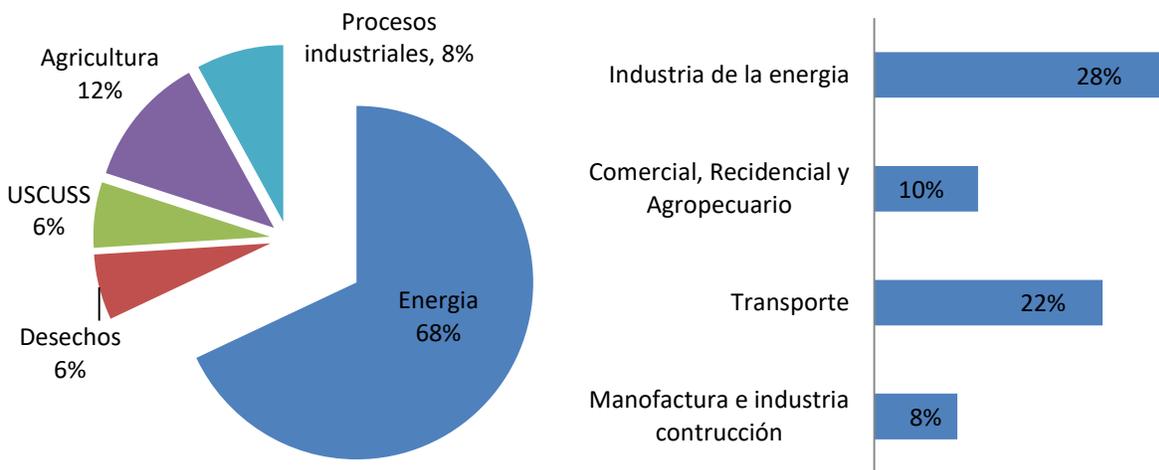


Figura 1.1 Distribución de GEI México, 2010 (SEMARNAT, 2013)

1.1.2 Inventarios en emisiones de GEI en sedimentos

Los Inventarios directos para el uso del suelo, se pueden estimar fuentes y sumideros de CO₂ utilizando series de mediciones en el tiempo, a nivel del suelo o cerca del nivel del suelo (por ejemplo, el contenido de carbono de un ecosistema no es el mismo que debajo de la superficie). Si se tomaran mediciones de todas las fuentes y sumideros, se podría estimar los GEI de los ecosistemas con bastante precisión (G-Science, 2012; SEMARNAT, 2012).

1.2 SEDIMENTOS

Los sedimentos son capas de materia finamente dividida que cubren los fondos de los ríos, arroyos, lagos, embalses, bahías y océanos. Típicamente consisten en mezclas de minerales granulados de tamaño fino (limo de 62 a 4 micras de diámetro y arcilla menos de 4 micras de diámetro), medio (arena de 2 mm a 64 micras) y grueso (gravas más de 2 mm de diámetro), mezclados con materia orgánica (MO). Su composición puede variar de materia mineral pura a orgánica. Los sedimentos son depósitos de una variedad de desechos biológicos, químicos y contaminantes (residuos) en los cuerpos o reservorios de agua, siendo sumideros de contaminantes como metales y compuestos orgánicos tóxicos. Es de particular preocupación la transferencia de especies químicas de los sedimentos a las cadenas alimenticias acuáticas vía organismos, tales como gusanos y almejas, que pasan parte importante de su ciclo de vida en contacto con los sedimentos (Manahan, 2006).

1.2.1 Contaminación en sedimentos

Uno de los problemas más graves del deterioro ambiental es la contaminación del agua y sedimentos. La disminución en su calidad daña a los ecosistemas, la salud humana y a la disponibilidad de fuentes de agua (CNA, 2014; EPA, 2004).

La contaminación se debe, primordialmente, a la descarga a los cuerpos receptores de una gran parte del caudal de aguas residuales sin tratamiento, por los municipios y las industrias, al uso de fertilizantes y plaguicidas en la agricultura, a la inadecuada recolección y disposición de los residuos sólidos municipales e industriales y al acelerado proceso de erosión causado por prácticas inadecuadas en las actividades agropecuarias y silvícolas (CNA, 2014; EPA, 2004).

En México del 100% de las aguas y sedimentos de los principales ríos, lagunas, lagos, presas y humedales (en promedio de los estudios realizados de DBO₅ y DQO), el 22.77% se considera sin contaminación (calidad excelente), el 22.8% con muy poca contaminación (calidad aceptable), el 26.96% con poca contaminación (calidad regular), el 18.5% como contaminado (calidad mala) y el 3.7% como altamente contaminado (calidad pésima). En resumen, el 72.23% presenta en algún grado contaminación (CNA, 2014).

El costo total en el año 2013 por degradación por contaminación de aguas y sedimentos en México fue de 70,627 millones de pesos, que representan un 0.4% del Producto Interno bruto (PIB) (INEGI, 2015).

De los sedimentos de origen humano con alto contenido de microorganismos, se generan, debido a la actividad bacteriana en la degradación tanto aerobia como anaerobia de la misma, gases como CH₄, CO₂, NH₃ y H₂S (Marín, 2003; Atlas y Bartha, 2006).

1.2.2 Dispositivos usados en el Muestreo de sedimentos

Los dispositivos para la toma de muestras en sedimentos se pueden dividir en dos categorías, el tipo draga (Figura 1.2) y el de núcleo (Salazar y Peñuela, 2010; NACEC, 2012).

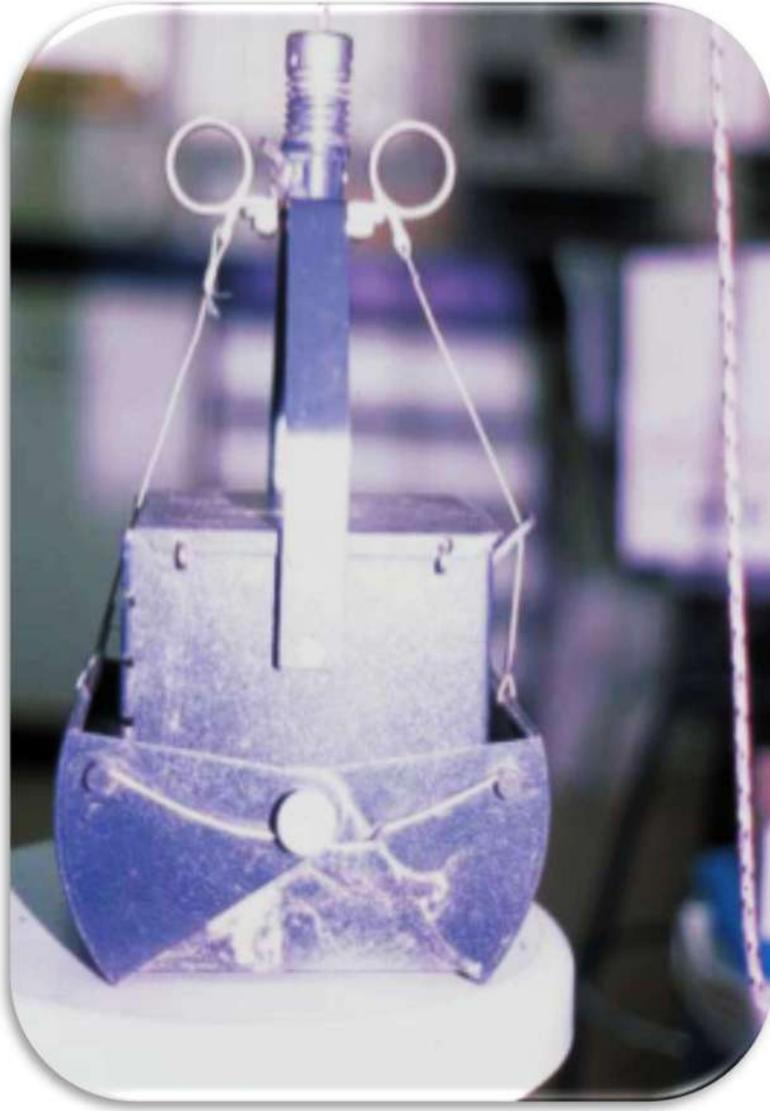


Figura 1.2 Muestreador tipo draga Ekkman (Salazar y Peñuela, 2010)

Dependiendo de la cantidad y profundidad del agua, deben ser operados por buzos o empleando plataformas estables tales como botes, puentes o muelles.

Los muestreadores tipo draga son dispositivos en forma de quijada diseñados para recoger sedimentos superficiales mediante excavación de un área definida, los más comunes de este tipo son las dragas Ekman, Shipek (Figura 1.3 a y b), su capacidad depende de la firmeza del sedimento.

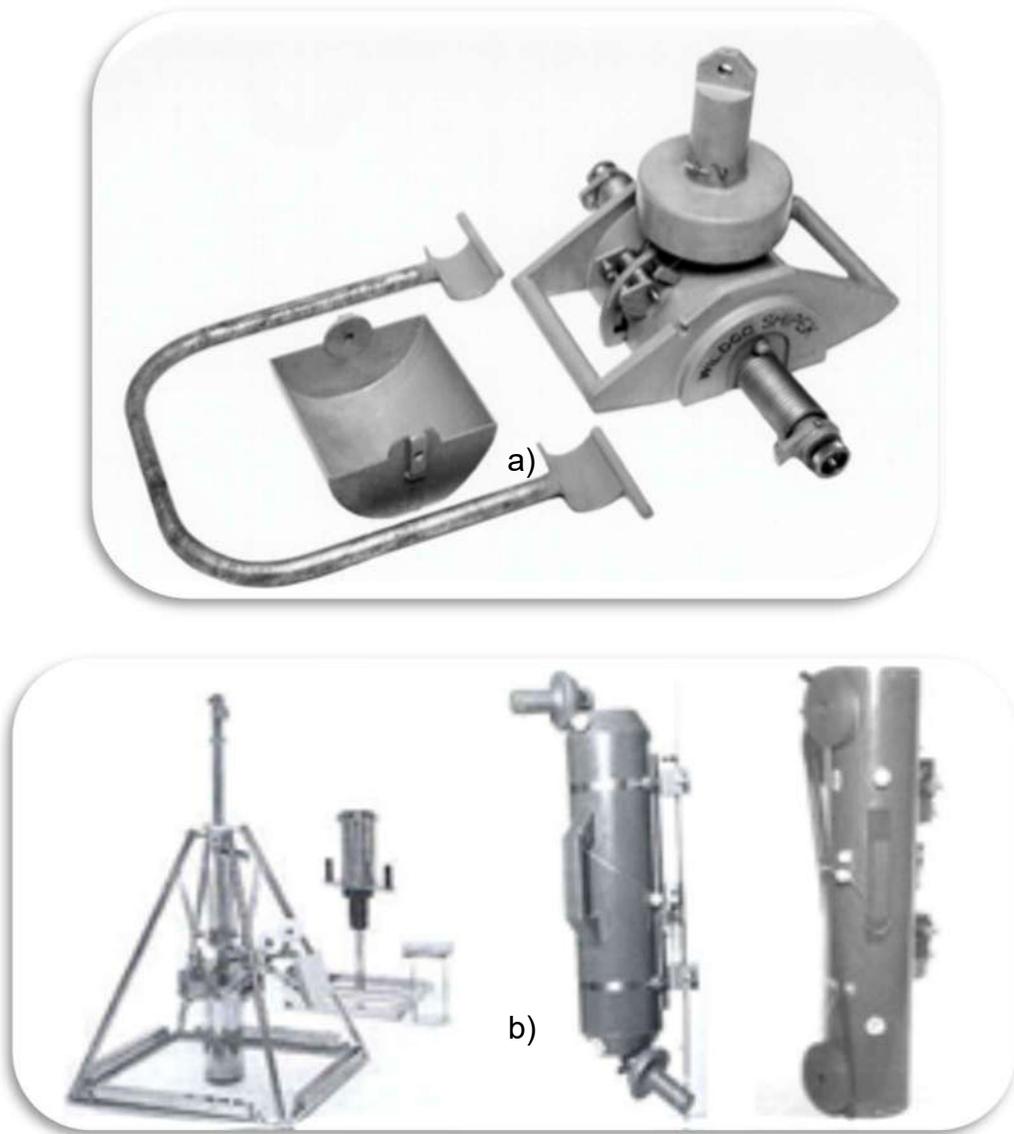


Figura 1.3 Muestreadores a) Shipek y b) Ponar (Salazar y Peñuela, 2010; NACEC, 2012)

Los sedimentos que están muy compactados deben extraídos con muestreadores tipo núcleo. Que son dispositivos en forma de tubo que les permiten penetrar a mayores profundidades, como se indica en la Figura 1.4 (Salazar y Peñuela, 2010; NACEC, 2012).



Figura 1.4 Muestreador tipo núcleo (Salazar y Peñuela, 2010)

1.3 EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN UTILIZADO PARA MEDICIONES *IN SITU*

Para las mediciones *in situ* de CH₄, CO₂, O₂, NH₃, pH y temperatura, se utilizan equipos portátiles de instrumentación, como los que se describen en la Tabla 1.1 se hace un resumen de las características más importantes de todos los equipos vistos anteriormente con los costos actuales del mercado en pesos mexicanos, incluyen el IVA y los gastos de importación.

Tabla 1.1 Tabla comparativa de equipos de medición

| Equipo | Características principales | Ventajas | desventajas | costo |
|--------------------------|--|--|---|--------------|
| Gem5000 | Medición de gases CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂ , temperatura, presión estática, presión diferencial y flujo. | Muy completo, amplio rango de gases, capacidad de medir en % de concentración, LEL y ppm | No mide pH, NH ₃ y conductividad. No tiene capacidad para medir en sedimentos, no tiene GPS | \$249,018.75 |
| Triple Plus + | Medición de gases CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, y NH ₃ | Amplio rango de gases, portátil | No mide O ₂ , pH, temperatura y conductividad. No tiene capacidad para medir en sedimentos, no tiene GPS | \$89,775.00 |
| IBRID MX6 | Medición de gases CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂ y NH ₃ | Amplio rango de gases, portátil | No mide pH, temperatura y conductividad. No tiene capacidad para medir en sedimentos, no tiene GPS, las concentraciones de gases solo son LEL | \$69,025.00 |
| Tetra 5 | Medición de gases CH ₄ , CO, H ₂ S y O ₂ | Portátil, bajo costo | No mide CO ₂ , NH ₃ , pH, temperatura y conductividad. No tiene capacidad para medir en sedimentos, no tiene GPS, las concentraciones de gases solo son LEL | \$35,906.25 |
| HI 99121 | Medidor de pH y temperatura en sedimentos. | Portátil, medición en sedimentos | No mide Gases y conductividad, no tiene GPS, poca capacidad de almacenamiento de datos. | \$9,500.00 |
| Testo 206-pH | Medidor de pH y temperatura en sedimentos. | Portátil, medición en sedimentos, bajo costo. | No mide Gases y conductividad, no tiene GPS, poca capacidad de almacenamiento de datos. | \$4,750.00 |
| Hanna HI 993310 | Medidor de conductividad | Portátil, medición en suelos y sedimentos | No mide Gases y pH, no tiene GPS, no tiene capacidad de almacenamiento de datos. | \$18,757.50 |
| Conductronic PC18 | Medidor de pH, conductividad y temperatura | Portátil | No mide Gases, no tiene GPS, No tiene capacidad de almacenamiento de datos. | \$29,000 |

Fuente: Hanna, 2016; Testo, 2016; PCE, 2016; Conductronic, 2016; Landtec, 2015.

1.4 SENSORES

Los sensores son sistemas o dispositivos que realizan la conversión de una magnitud física cualquiera a una magnitud eléctrica, generalmente intensidad, voltaje o impedancia, de forma que esta última constituya una réplica, tan perfecta como sea posible (Granada y Mediavilla, 2009; Pallas, 2005).

1.4.1 Sensores de Gases

En el mercado existen una gama muy amplia de tipos de sensores de gases, todos tienen un propósito en particular, desde análisis de gases cualitativo (si hay o no un tipo de gas) o cuantitativo (Medir la concentración exacta y precisa de un gas). En la Tabla 1.2 se describen algunos de ellos.

Tabla 1.2 Comparación entre sensores de diferentes tipos de operación

| | Sensor | Gas objetivo | Tipo | Tiempo de respuesta (segundos) | Interferentes | Vida | RANGO |
|---|------------|------------------|----------------|--------------------------------|--|---------|------------------|
| 1 | MQ-4 | CH ₄ | Semiconductor | 18 a 40 | Hidrocarburos, alcoholes e hidrogeno | 2 años | 300 a 10,000 ppm |
| 2 | MQ-135 | CO ₂ | Semiconductor | 18 a 40 | Hidrocarburos, alcoholes y NH ₃ | 2 años | 10 a 10,000 ppm |
| 3 | MQ-135 | NH ₃ | Semiconductor | 18 a 40 | Hidrocarburos y alcoholes | 2 años | 10 a 300 ppm |
| 4 | 3SP_H2S_50 | H ₂ S | Electroquímico | < 15 | CH ₄ , NH ₃ , CO, O ₃ , SO ₂ , NO ₂ | 10 años | 0-50 ppm |
| 5 | CM-0201 | O ₂ | UV | < 30 | no hay interferentes | >5 años | 0-25% |
| 6 | GC-0018-17 | CO ₂ | NDIR | < 15 | no hay interferentes | 15 años | 0-20% y 0-100% |
| 7 | 4H2S-1000 | H ₂ S | Electroquímico | <45 | no hay interferentes | 2 años | 0-1000 ppm |
| 8 | 7NH3-500 | NH ₃ | Electroquímico | <60 | H ₂ S | 2 años | 0-500 ppm |

1.4.2 Sensor de Gases por Absorción Infrarroja No Dispersiva (AIRND)

Un sensor de infrarrojo no dispersivo, es un simple dispositivo espectroscópico de uso frecuente como detector de gas (TI, 2013; Wong, 2013; Hakonen, 2010; Milosavljevic, 2013).

Está basado en el principio de que las moléculas de gas absorben luz infrarroja y esta absorción ocurre en una longitud de onda específica. Típicamente se usa un detector termopila con un filtro para determinar la concentración de un gas específico. Por ejemplo, el CO₂ tiene una fuerte absorción en la longitud de onda de 4260 nm, un filtro pasa banda es usado para remover toda la luz fuera de esta longitud de onda. La Figura 1.5 muestra el principio de operación de un sensor de gas NDIR.

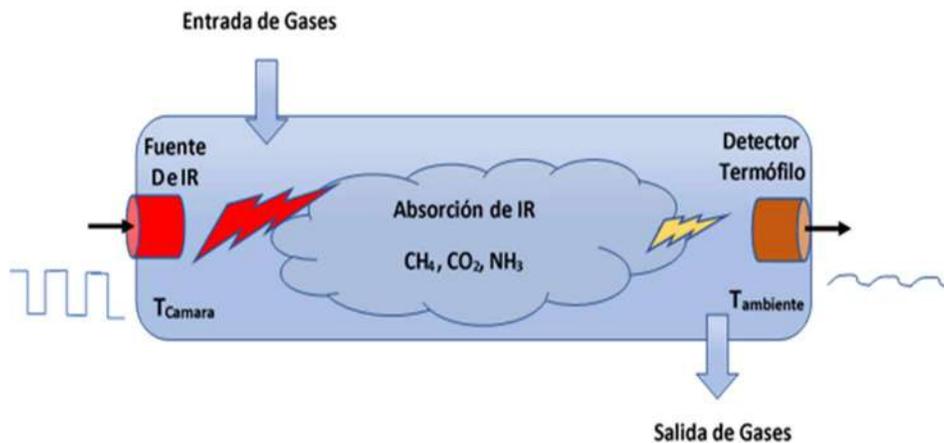


Figura 1.5 Principio de operación de un sensor AIRND

Las moléculas absorben la energía de la fuente de radiación infrarroja (IR). La absorción sigue la ley de Lambert-Beer:

$$I = I_0 e^{-k l x}$$

Ec. 1

Donde, I es la intensidad IR transmitida al detector termopila, I_0 es la intensidad de IR inicial en la fuente, k es el coeficiente de absorción del gas objetivo, x es la concentración de gas y l es la longitud que hay entre la fuente de IR y el detector termopila.

El principio de termopila es usado para detectar los cambios de intensidad de la luz IR. El voltaje de salida de detector es:

$$V = n * \Delta\alpha * (T_{cámara} - T_{ambiente}) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde, $\Delta\alpha$ es la diferencia de los coeficientes de Seebeck de los materiales termopila y n es el número de termocoples en el detector termopila. $T_{cámara}$ es la temperatura del cuerpo oscuro que es emitido en por la fuente de radiación, y la $T_{ambiente}$ es la temperatura ambiental.

En el interior de la cámara. La radiación de la energía de la fuente de IR puede ser considerada como ideal en una cámara oscura. La radiación emitida por el cuerpo oscuro tiene como resultado una diferencia de temperatura entre el cuerpo oscuro y el ambiente que se conoce como radiación térmica. Acorde a la ley de Stefan-Boltzmann, la radiación térmica por unidad de área puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$R_T = \sigma * (T_{cámara}^4 - T_{ambiente}^4) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde, $\sigma = 5.67 * 10^{-8} W/(m^2 * K^4)$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

Asumiendo que no hay pérdidas en la intensidad de la luz IR a través de toda la cámara entonces $R_T = I$. Después de reorganizar las ecuaciones, la ecuación de salida de voltaje sería:

$$V = n * \Delta\alpha * [I_0 * e^{-kcl}] / [\sigma * (T_{cámara}^2 - T_{ambiente}^2)] * (T_{cámara} - T_{ambiente}) \quad \text{Ec. 4}$$

Si se examina la ecuación la salida de voltaje puede ser afectada por la temperatura ambiente y la intensidad de luz IR incierta, por lo que se debe tener en consideración la compensación de temperatura, esto es implementando sensores de temperatura en los detectores termopilas y de temperatura ambiental (Alphasense, 2017; TI, 2017; Wong, 2013; Hodgkinson *et al.*, 2013; Hakonen, 2010).

1.4.3 Ecuación Ideal de Lambert-Beer para absorción de gas AIRND

La Ley de Lambert-Beer dice que intensidad infrarroja en el detector activo decrece acorde a la relación exponencial (AD, 2018; TI, 2013; Parnis y Oldham, 2013; Neira, 2010):

$$I = I_0 e^{-kl} \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

I es la intensidad en el gas objetivo.

I_0 es la intensidad en gas cero.

k es el coeficiente de absorción para el gas específico y la combinación del filtro.

l es la longitud óptica entre la lámpara y los detectores.

x es la concentración de gas.

Para la salida activa del detector, donde la salida corresponde a un cambio de voltaje, $V_0 - V$:

$$A = \frac{(V_0 - V)}{V_0} = \frac{(I_0 - I)}{I_0} = 1 - \frac{I}{I_0} \quad \text{Ec. 6}$$

Dónde:

A es la absorbancia.

V_0 es la salida en gas CERO.

V es la salida en gas objetivo.

Combinando las dos ecuaciones anteriores tenemos:

$$A = 1 - e^{-kIx}$$

Ec. 1.7

Si k y l son constantes, A puede graficarse como x como se muestra en la figura 1.6 (donde $kl = 115, 50, 25, 10$ y 4.5). El valor de A incrementa con c , pero eventualmente se satura con altas concentraciones de gas, debe tenerse especial cuidado al momento de integrar la cámara de gases donde se hará la medición (AD, 2018; TI, 2013; Parnis y Oldham, 2013; Neira, 2010).

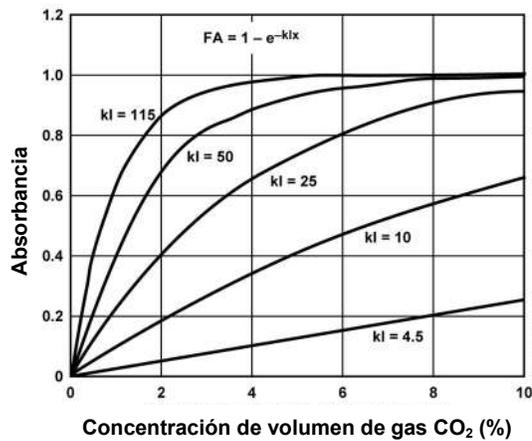


Figura 1.6 Absorbancia típica para $kl = 4.5, 10, 25, 50, 115$

Los parámetros k e l , pueden ser ajustados para obtener una óptima absorbancia para cualquier rango de concentración. Esto significa que una longitud óptica larga para bajas concentraciones y una longitud óptica corta para altas concentraciones.

A continuación, se describe el procedimiento de calibración a dos puntos necesarios para determinar la constante kl , usando la ecuación ideal de Lambert-Beer (TI, 2013; AD, 2018; Parnis y Oldham, 2013; Neira, 2010).

$$A = 1 - \left(\frac{I}{I_0}\right) \quad \text{Ec. 8}$$

$$A = 1 - e^{-bx} \quad \text{Ec. 9}$$

La primera parte de la calibración requiere aplicar una baja concentración de gas objetivo en este caso de CO₂ (de preferencia nitrógeno puro, esto es 0% vol) al sensor de gases:

- ACT_{LOW} es la salida pico a pico del detector del gas objetivo en baja concentración.
- REF_{LOW} es la salida de pico a pico del detector de referencia en baja concentración de gas.
- T_{LOW} es la temperatura en baja concentración de gas.

La segunda parte de la calibración requiere aplicar una concentración conocida del gas objetivo (x_{CAL}). Usualmente, el nivel de concentración x_{CAL} es el valor máximo del rango por ejemplo del CO₂ en la calidad de aire industrial es de 0.5% (TI, 2013; AD, 2018; Parnis y Oldham, 2013; Neira, 2010).

- ACT_{CAL} es la salida pico a pico del detector del gas objetivo en la concentración del gas de calibración x_{CAL}.
- REF_{CAL} es la salida pico a pico del detector de referencia en la concentración del gas de calibración x_{CAL}.

En las siguientes dos ecuaciones simultáneas se desconoce (I₀ y b):

$$1 - \frac{I_{LOW}}{I_0} = SPAN(1 - e^{-b(x_{low}^c)}) \quad \text{Ec. 10}$$

$$1 - \frac{I_{CAL}}{I_0} = SPAN(1 - e^{-b(x_{cal}^c)}) \quad \text{Ec. 11}$$

Resolviendo las dos ecuaciones para I₀ y b,

$$I_0 = CERO = \frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \left(\frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \frac{REF_{CAL}}{ACT_{CAL}} \right)^{\frac{x_{LOW}}{x_{CAL} - x_{LOW}}} \quad \text{Ec. 12}$$

$$b = \left[\frac{\ln \left(\frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \frac{REF_{CAL}}{ACT_{CAL}} \right)}{x_{CAL} - x_{LOW}} \right] \quad \text{Ec. 13}$$

Entonces, para una concentración desconocida (x), donde:

- ACT es la salida pico a pico del detector activo de un gas desconocido.
- REF es la salida pico a pico del detector de referencia de un gas desconocido.
- T es la temperatura del gas desconocido en °K.

$$A = 1 - \left(\frac{I}{I_0} \right) = 1 - \frac{ACT}{REF \times CERO} \quad \text{Ec. 14}$$

$$x = \frac{T}{T_{LOW}} \left[\frac{\ln(1 - A)}{-b} \right]$$

$$x = \frac{T}{T_{LOW}} \left[\frac{\ln \left(\frac{ACT}{REF \times CERO} \right)}{-b} \right] \quad \text{Ec. 15}$$

El factor T/T_{LOW} compensa para el cambio en la concentración con la temperatura según la ley de gases ideales (TI, 2013; AD, 2018; Parnis y Oldham, 2013; Neira, 2010).

1.4.4 Ecuación ideal de Lambert-Beer modificada

En consideración en la implementación práctica de NDIR requiere modificaciones a la ley de Lambert-Beer, para obtener lecturas precisas:

$$A = SPAN \left(1 - e^{-bx^c} \right) \quad \text{Ec. 16}$$

El factor SPAN es introducido porque no toda la radiación es impregnada sobre el termopila activo, es absorbido por el gas, más en concentraciones altas. SPAN es menos de 1 porque el ancho de banda del filtro y la fina estructura en el espectro de absorción.

Variaciones en la longitud óptica y la dispersión de la luz requieren la adición de un término de potencia, c , para una adecuada precisión de los datos de absorción (TI, 2013 y AD, 2018).

El valor de b y SPAN constantes también dependen del rango de concentración medidos. Los valores típicos de concentración para el CO_2 :

- Calidad del aire industrial (IAQ): 0 a 0.5% vol (5000 ppm). Nota la concentración de CO_2 el ambiente es de aproximadamente 0.04% vol, o 400 ppm.
- Seguridad: 0 a 5% vol
- Combustión: 0 a 20% vol
- Control de procesos: 0 a 100% vol

Los valores exactos de b y c son determinados mediante la adquisición la toma de una buena consideración de datos de A y de la concentración (x) y usando la curva mediante un programa adecuado.

Para un sistema donde las constantes b y c tienen que ser determinadas, el valor de CERO y SPAN, pueden ser calculadas mediante el método de calibración de dos puntos (TI, 2013 y AD, 2018).

El primer paso en el procedimiento es aplicar una baja concentración de x_{LOW} y almacenar lo siguiente:

- ACT_{LOW} : La salida pico a pico del detector activo en baja concentración de gas.
- REF_{LOW} : La salida pico a pico del detector de referencia en baja concentración de gas.
- T_{LOW} : La temperatura en baja concentración de gas en $^{\circ}\text{K}$.

La segunda parte de la calibración requiere aplicar el gas objetivo (CO_2 , CH_4 o NH_3) a

una concentración conocida (x_{CAL}). Usualmente el máximo del rango que se vaya a operar el equipo. Almacenar lo siguiente:

- ACT_{CAL} : La salida pico a pico del detector activo de la concentración del gas de calibración x_{CAL} .
- REF_{CAL} : La salida pico a pico del detector de referencia de la concentración del gas de calibración x_{CAL} .

En las siguientes dos ecuaciones simultáneas se desconoce (I_0 y SPAN):

$$1 - \frac{I_{LOW}}{I_0} = SPAN(1 - e^{-b(x_{low}^c)}) \quad \text{Ec. 17}$$

$$1 - \frac{I_{CAL}}{I_0} = SPAN(1 - e^{-b(x_{cal}^c)}) \quad \text{Ec. 18}$$

Resolviendo las dos ecuaciones para I_0 y SPAN,

$$I_0 = CERO = \frac{ACT_{LOW}(e^{-b(x_{cal}^c)} - 1)REF_{CAL} + ACT_{CAL}(1 - e^{-b(x_{low}^{c-1})})REF_{LOW}}{(e^{-b(x_{cal}^c)} - e^{-b(x_{low}^c)}) \times REF_{CAL} \times REF_{LOW}} \quad \text{Ec. 19}$$

$$SPAN = \frac{ACT_{CAL} \times REF_{LOW} - ACT_{LOW} \times REF_{LOW}}{ACT_{LOW}(e^{-b(x_{cal}^c)} - 1)REF_{CAL} + ACT_{CAL}(1 - e^{-b(x_{low}^{c-1})})REF_{LOW}} \quad \text{Ec. 1.20}$$

Entonces, para la concentración desconocida de un gas, donde:

- ACT es la salida pico a pico del detector activo de la concentración desconocida de un gas.
- REF es la salida pico a pico del detector de referencia de la concentración desconocida de un gas.
- T es la temperatura del gas en K.

$$A = SPAN(1 - e^{-bx^c}) \quad \text{Ec. 21}$$

$$A = 1 - \frac{ACT}{REF \times CERO} \quad \text{Ec. 22}$$

$$x = \frac{T}{T_{LOW}} \left[\frac{\ln \left(1 - \frac{A}{SPAN} \right)}{-b} \right]^{\frac{1}{c}} \quad \text{Ec. 23}$$

Esta ecuación asume que $T_{LOW} = T_{CAL}$

1.4.5 Efectos de la temperatura ambiental en el sensor AIRND

Los detectores termopilas sensan la temperatura por la absorción de radiación, pero también responden a los cambios de la temperatura ambiental lo que genera espurios afectando la señal. Por esta razón muchos detectores termopila tienen termistores integrados en el mismo encapsulado.

La absorción de radiación es relacionada al número de moléculas objetivo en la cámara, no al porcentaje absoluto del gas objetivo. Por lo tanto, la absorción es descrita por la ley de los gases ideales y la presión atmosférica estándar (AD, 2018 y TI, 2013).

Es necesario almacenar la temperatura tanto en la calibración como en la medición de los gases:

$$x_T = \frac{T}{T_{LOW}} x \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

x es la concentración de gas sin compensación de temperatura.

T_{LOW} es la temperatura de calibración en °K tanto en baja y alta concentración.

T es la temperatura durante el muestreo en °K.

x_T es la concentración del gas en la temperatura T .

Debido a la ley de los gases ideales la variación de la concentración por la temperatura, SPAN y A varían significativamente con la temperatura y requiere de la corrección para tener precisión en las mediciones (AD, 2018 y TI, 2013).

1.4.6 Conceptos para la selección de filtros para luz IR

Los conceptos que se deben tomar en cuenta al seleccionar los filtros y al diseñar el prototipo son los siguientes.

Longitud de onda (λ): Es la distancia desde cualquier punto en la onda hasta el punto correspondiente en la siguiente onda (Figura 1.7). En general se mide en micrómetros o nanómetros (Yurkanis, 2008).

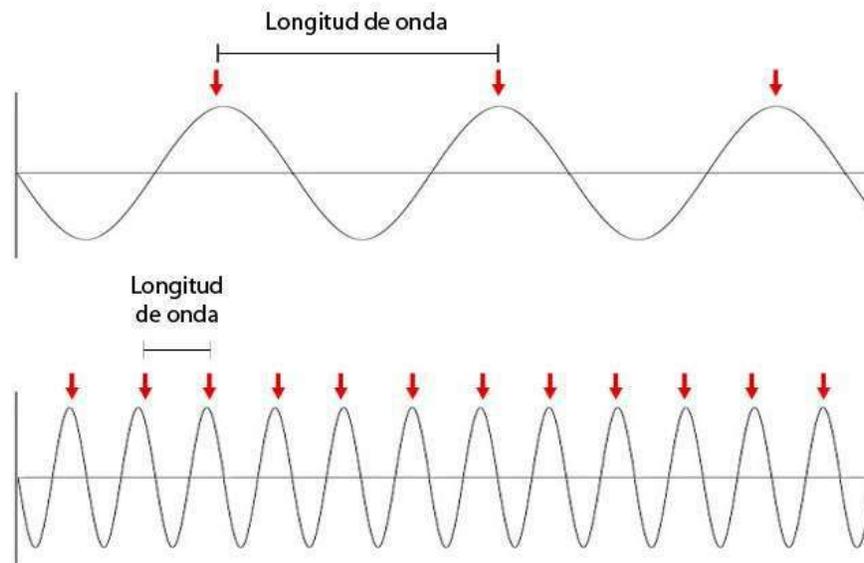


Figura 1.7 Longitud de onda

Ancho de banda (BW): Se define como el intervalo de longitudes de onda de radiación saliente de la rendija de salida de una fuente de radiación medida en la mitad de un pico del flujo radiante detectado (f_0), ver Figura 1.8, (Castañeda, 2015).

Frecuencia (F): Se define como la cantidad de crestas de onda que pasan por determinado punto en un segundo (Yurkanis, 2008).

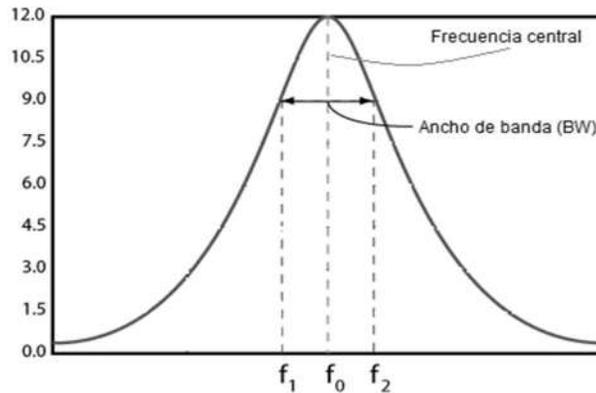


Figura 1.8 Ancho de banda

Espectro infrarrojo: Un espectro infrarrojo se obtiene haciendo pasar la radiación infrarroja a través de una muestra de un compuesto; y se obtiene una gráfica del porcentaje de la transmitancia de la radiación en función del número de onda (o de la longitud de onda) de la radiación transmitida. En la figura 1.9 se puede observar un ejemplo de espectro IR (Yurkanis, 2008).

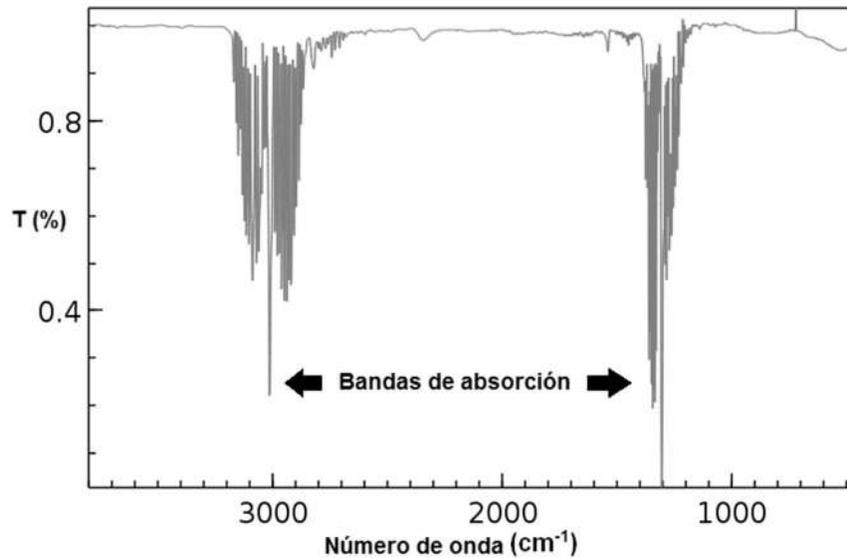


Figura 1.9 Espectro IR del metano

Bandas de absorción: Son los picos en dirección hacia abajo en espectro IR. Cada pico representa absorción de energía. En la figura 1.9 se presenta un ejemplo de bandas de absorción (Castañeda, 2015).

1.4.7 Detectores termopilas NDIR TS4x200B-A-S1.5-2-Kr-D2 /E1/ 3357/ 10350 y Fuente de luz Infrarroja JSIR350-4-AL-R-D6.0-0-0

Los detectores termopilas son en sí un conjunto de varios cientos de termopares sensibles a la luz IR generando cada uno una FEM en el orden de los pV, suman todos sus voltajes para generar mV y de esta manera poder ser procesadas, el TS4x200B-A-S1.5-2-Kr-D2 /E1/ 3357/ 10350 (Figura 1.10 [a]), es un módulo que fue diseñado durante la investigación y fabricado en Alemania por la compañía Micro-Hybrid, con las características determinadas en esta investigación, consiste en 4 detectores termopila uno para luz IR de referencia y tres para los gases objetivo CH_4 , CO_2 y NH_3 . A cada detector se le monto el filtro de banda de absorción de IR específico para cada gas y luz IR de referencia, como se indica en la Tabla 1.3. La Fuente de luz IR JSIR350-4-AL-R-D6.0-0-0 se muestra en la Figura 1.x [b] (Micro-Hybrid, 2011).

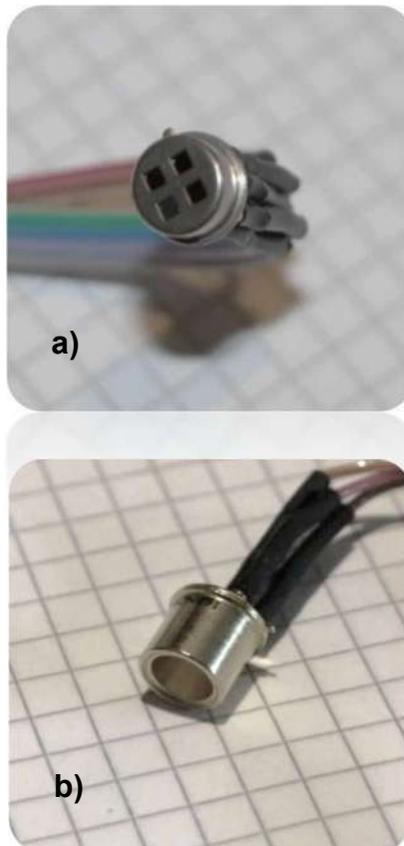


Figura 1.10 Detectores termopilas (a) y Fuente de IR (b)

Las características del detector termopila se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 1.3 Características del detector infrarrojo TS4x200B-A-S1.5-2-Kr-D2 /E1/ 3357/10350 (Micro-Hybrid, 2011).

| Parámetro | Valor | Unidades |
|--|---|-----------------|
| Área Activa | 4x (1.2 x 1.2) | mm ² |
| Apertura | 4x (1.5 x 1.5) | mm ² |
| Número de termocoples por canal | 200 | unidades |
| Constante de Tiempo | 30 | ms |
| Salida de Voltaje | 5.5 | mV |
| Sensibilidad de voltaje | 100 | V/W |
| Coefficiente de temperatura de sensibilidad | -0.4 | %/K |
| Ruido de voltaje | 33 | nV/Hz |
| Resistencia de termopila | 65 ±15 | kΩ |
| Coefficiente de temperatura de resistencia | -0.03 | %/K |
| Tipo de termistor | NTC30K | |
| Gas de relleno | Kr | |
| Filtros | D2: Ref Filter 3910 CWL / BW 70nm E1: CO2 Filter 4265 CWL / BW 110nm 10400: Custom NH3 Filter 10350 CWL 3330: Custom Methane Filter 3357 CWL | |
| Temperatura de operación | -20 a 70 | °C |
| Carcasa | TO39 (Modificado) | |

El circuito eléctrico equivalente se muestra en la Figura 1.12.

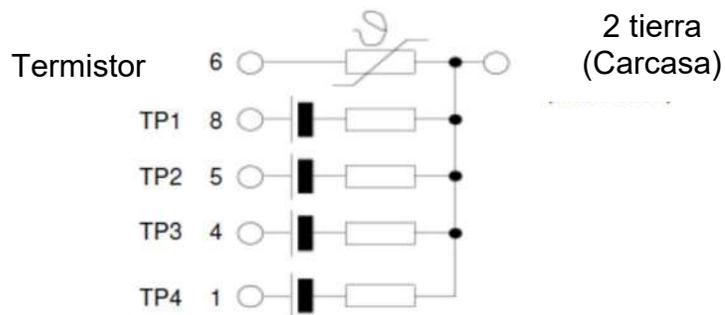


Figura 1.12 Circuito eléctrico equivalente del detector TS4x200B-A-S1.5-2-Kr-D2 /E1/ 3357/ 10350 (Micro-Hybrid, 2011)

La fuente de luz infrarroja JSIR350-4-AL-R-D6.0-0-0, está diseñada especialmente para los detectores termopilas en la detección de gases no dispersivo, por el reflector integrado, con la temperatura de operación ajustada a 640 °C, la vida de operación es de 100,000 horas, tiene integrado un cristal para evitar envenenamiento por gases corrosivos (EOC, 2017). Las características de la fuente IR se muestra en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Características de la fuente de IR JSIR350-4-AL-R-D6.0-0-0 (EOC, 2017)

| Parámetro | Valor | Unidades |
|-----------------------------|--|-----------------|
| Rango de salida espectral | De 1 a 20 | μm |
| Área Activa | 2.2 x 2.2 | mm ² |
| Resistencia en caliente | 40 ± 20 | Ω |
| Consumo de potencia nominal | 0.65 | W |
| Voltaje de operación típico | 5.7 | V |
| Temperatura del área activa | 640 | °C |
| Masa | 1 | G |
| Encapsulado | TO39 (Modificado) | |
| Tiempo de vida | >5,000 h a 740°C >100,000 h a 640°C | |

Las características del encapsulado TO39 y la asignación del patillaje de la fuente de IR se muestran en la Figura 1.13.

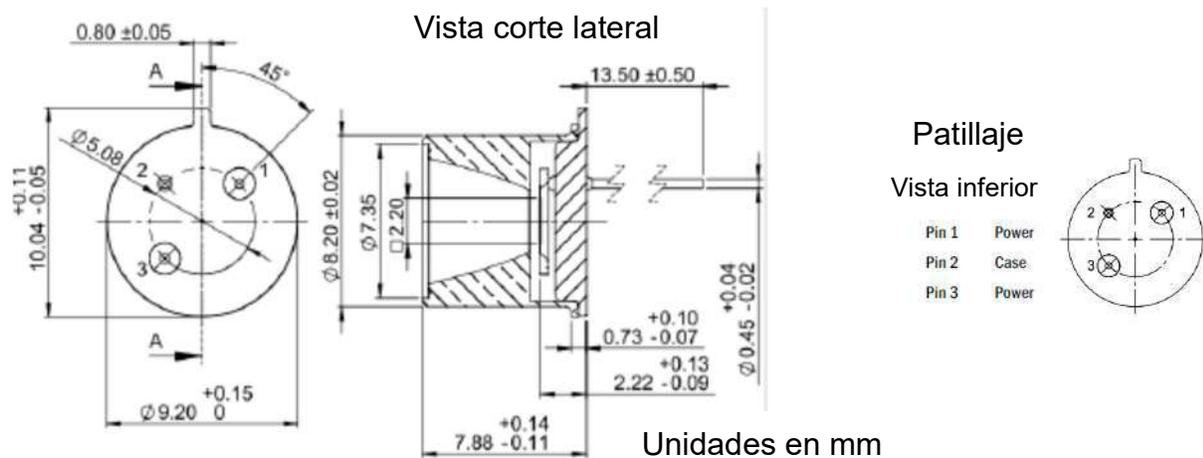


Figura 1.13 Características del encapsulado TO39 modificado para la fuente de IR y orden de patillaje (EOC, 2017)

La respuesta de la fuente de IR, depende de la potencia, filtro y cristal protector, como se puede ver en la Figura 1.14 (a), el porcentaje de emisividad depende de la potencia, entre más potencia más emisividad, pero al tener mayor potencia la vida del dispositivo disminuye considerablemente a 600 mW la vida promedio es de aproximadamente 100,000 horas, y a máxima potencia 1000mW la vida se reduce a un promedio de 5,000 horas. En lo particular se utilizará la mínima potencia para una larga duración de vida útil del dispositivo (EOC, 2017).

La distribución de radiación angular más eficiente es solo usando el reflector de la fuente de IR como se muestra en la Figura 1.14 (b), con el uso de filtro o de cristal protector el ángulo de radiación aumenta, disminuyendo un poco su eficiencia en potencia y emisividad, en este prototipo se utilizará el cristal protector para evitar contaminación de la fuente de IR de los gases corrosivos y humedad que pudiera ingresar el sensor, la disminución de eficiencia se soluciona con las paredes del cuerpo del sensor de material anti reflejante.

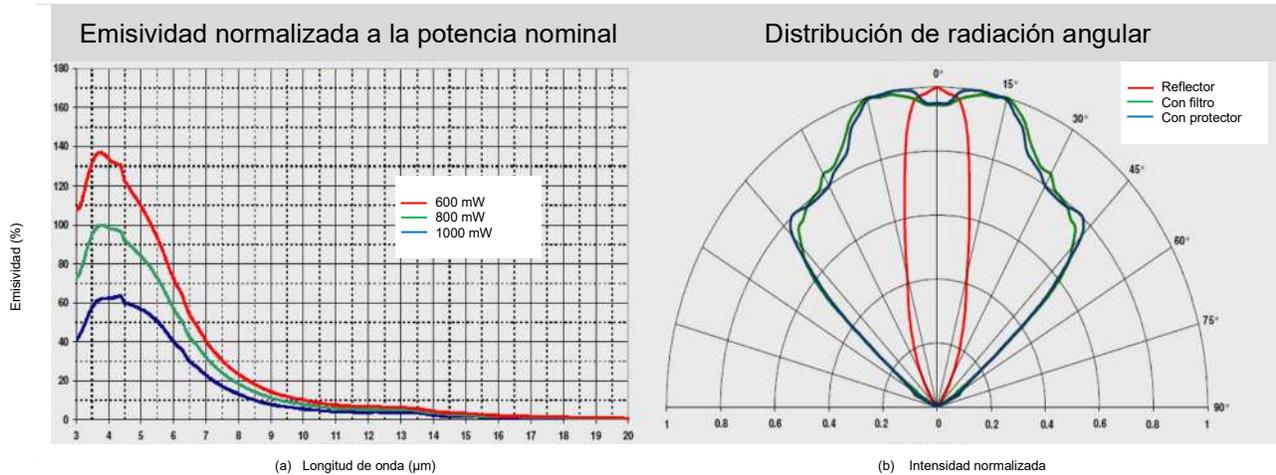


Figura 1.14 Gráficas de porcentaje de emisividad (a) y distribución de radiación angular (b) (Micro-Hybrid, 2017)

1.4.8 Sensor de Oxígeno (O₂) UV Flux OX-0052

El sensor de oxígeno seleccionado es de la marca CO2Meter modelo UV Flux OX-0052 (Figura 1.15), usando absorción de luz ultravioleta para detectar la concentración de oxígeno, las características principales de este sensor son:

- Nula interferencia con los gases en cuestión,
- Rango de operación es desde 0% al 25% de concentración v/v
- Rango de temperatura de -30°C a 60°C
- Humedad relativa 0 al 99% (no condensada)
- Rango de presión barométrica 500 a 1200 mbar
- Resolución 0.01%
- Tiempo de vida más de 5 años (CO2Meter, 2018).



Figura 1.15 Sensor de Oxigeno UV Flux OX-0052 (CO2Meter, 2018)

Las dimensiones del sensor y el orden del patillaje se muestran en la Figura 3.11

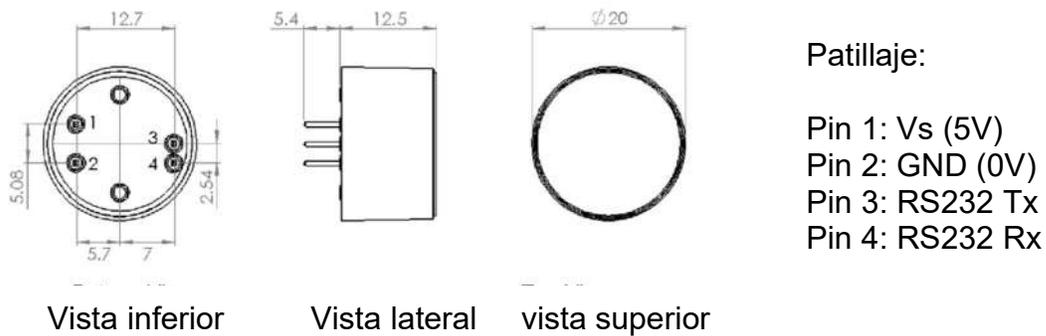


Figura 1.15 Dimensiones y patillaje del Sensor de O₂ UV Flux OX-0052

La calibración se realiza con gas de calibración al 4% de concentración, las lecturas se obtienen por medio del protocolo de comunicación serial RS-232. El voltaje de salida análogo es de 0 a 3 V, 0V representa 0% de concentración y 3V el valor máximo de 25% de concentración y la respuesta es lineal (CO2Meter, 2018).

1.4.9 Sensor de pH

El *pH* es una medida de la acidez o alcalinidad del agua con compuestos químicos disueltos. Su expresión viene dada por el logaritmo de la inversa de la concentración del ion *H*, expresada en moles por litro:

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]} \quad \text{Ec. 25}$$

El agua pura neutra tiene una concentración de ion hidrógeno de 10^{-7} moles por litro. Luego, el pH será:

$$pH = \log \frac{1}{[10^{-7}]} = 7 \quad \text{Ec. 26}$$

Una disolución ácida tiene mayor concentración de ion hidrógeno que el agua pura y, por lo tanto, su pH será menor de 7. Una disolución básica le ocurre a la inversa y su pH será mayor de 7. Las medidas prácticas del pH se encuentran entre los valores 0 a 14 (Creus, 2011).

En la medida de pH pueden utilizarse varios métodos, de entre los cuales los más exactos y versátiles de aplicación industrial son: el sistema de electrodo de vidrio y el de transistor de efecto de campo sensible a iones (ISFET) por sus siglas en inglés (*Ion Sensitive Field Effect Transistor*). El *electrodo de vidrio* consiste en un tubo de vidrio cerrado en su parte inferior con una membrana de vidrio especialmente sensible a los iones hidrógeno. En la parte interna de esta membrana se encuentra una solución de cloruro, tampón de pH constante, dentro de la cual está inmerso un hilo de plata recubierto de cloruro de plata (Creus, 2011).

Aunque el mecanismo que permite que el electrodo de vidrio mida la concentración de ion hidrógeno no es exactamente conocido, está establecido que al introducir el electrodo en el líquido se desarrolla un potencial relacionado directamente con la concentración del ion hidrógeno del líquido. Es decir, si esta concentración es mayor que la interior del electrodo existe un potencial positivo a través de la punta del electrodo y, si es inferior, el potencial es negativo (Creus, 2011). Este potencial cambia con la temperatura, por ejemplo, pasa de 54,2 mV a 0 °C a 74 mV a 100 °C por unidad de pH, ver Figura 1.16. Para medir el potencial desarrollado en el electrodo de vidrio es necesario disponer, en la solución, de un segundo elemento o electrodo de referencia. Éste, aparte de cerrar el

circuito, suministra un potencial constante que sirve de referencia para medir el potencial variable del electrodo de vidrio. El electrodo de referencia contiene una célula interna formada por un hilo de plata recubierto con cloruro de plata en contacto con un electrolito de cloruro de potasio. Este electrolito pasa a la solución muestra a través de una unión líquida. De este modo, la célula interna del electrodo permanece en contacto con una solución que no varía de concentración y que, por lo tanto, proporciona una referencia estable de potencial (Creus, 2011). Así, la medida del pH sólo es válida a la temperatura a la que se encuentra la solución.

| <u>°C</u> | <u>mV/pH</u> |
|-----------|--------------|
| 0 | 54,2 |
| 15 | 57,2 |
| 20 | 58,2 |
| 25 | 59,2 |
| 30 | 60,2 |
| 35 | 61,1 |
| 50 | 64,1 |

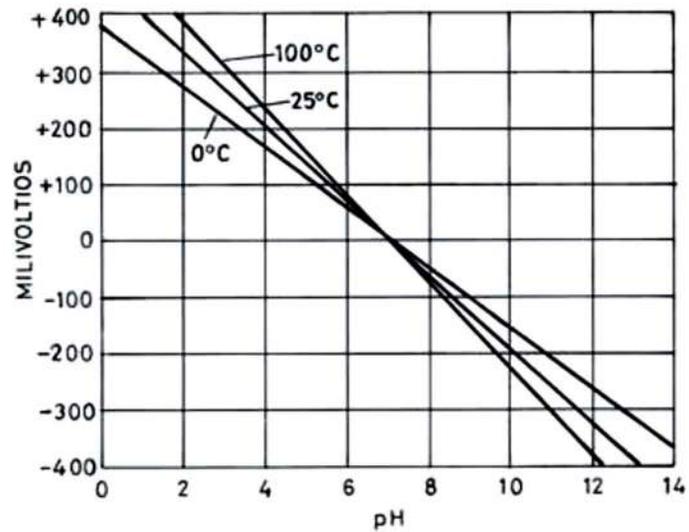


Figura 1.16 Relación mV-pH en función de la temperatura (Creus, 2011)

El *electrodo de transistor ISFET* es prácticamente irrompible, de estado sólido y proporciona una respuesta muy rápida. El sensor posee una señal de pH de baja impedancia, lo que le da una gran estabilidad, y tiene una larga duración, funcionando en los líquidos más sucios y con más impurezas. Incorpora un electrodo de referencia recambiable. La tensión generada por el elemento es (Creus, 2011):

$$V_{Banda\ plana} = E_{referencia} - \Psi_0 + \chi_{solución} - \frac{\phi_{Si}}{q} - \frac{Q_{ss} + Q_{ox}}{C_{ox}} \quad \text{Ec. 27}$$

en la que:

$E_{referencia}$ = potencial del electrodo de referencia

Ψ_0 = potencial superficial resultante de la reacción química

$\chi_{solución}$ = potencial bipolar superficial de la solución = constante

ϕ_{Si} = propiedad del material de silicio = constante

q = carga del electrón

Q_{ss} = densidad del estado superficial en el silicio

Q_{ox} = carga fija del óxido

C_{ox} = capacitancia aislante de la puerta (*gate*)/área unidad

El ISFET se diseña para que el potencial Ψ_0 , que es sensible al pH del electrolito, tenga la máxima sensibilidad y selectividad (Creus, 2011).

Sensor de pH HACH modelo PH77-SS

Es un sensor diseñado con la tecnología ISFET para ser más resistente que los electrodos tradicionales de bulbo, puede utilizarse en fase acuosa o en semisólida (ideal para sedimentos). Sus principales características son: Diámetro de 8.3 mm; longitud 140 mm; Material del cuerpo, Acero Inoxidable; rango de operación 0-14 pH; Precisión .01 pH; rango de temperatura de 0-60°C; sensibilidad 50 mV/pH. Es prácticamente irrompible para duras muchos años en operación, ver Figura 1.17 (HACH, 2016).



Figura 1.17 Sensor de pH HACH modelo PH77-SS

1.4.10 Sensor de temperatura (Termistor NTC)

Los termistores son sensores de temperatura hechos de material semiconductor que se han diseñado para mostrar grandes cambios en la resistencia en proporción a pequeños cambios en la temperatura. La resistencia puede medirse utilizando una pequeña corriente, que pasa a través del termistor para medir la caída de voltaje producida.

Los termistores NTC en sus siglas en inglés (Coeficiente de temperatura negativo) de estado sólido en realidad actúan como resistencias eléctricas que son sensibles a la temperatura. De ahí proviene el nombre, una clara combinación de las palabras térmica y resistencia. Son utilizados por su precisión y estabilidad en todo tipo de industria de -40°C a 150 °C (AMETERM, 2018) ver figura 1.18.

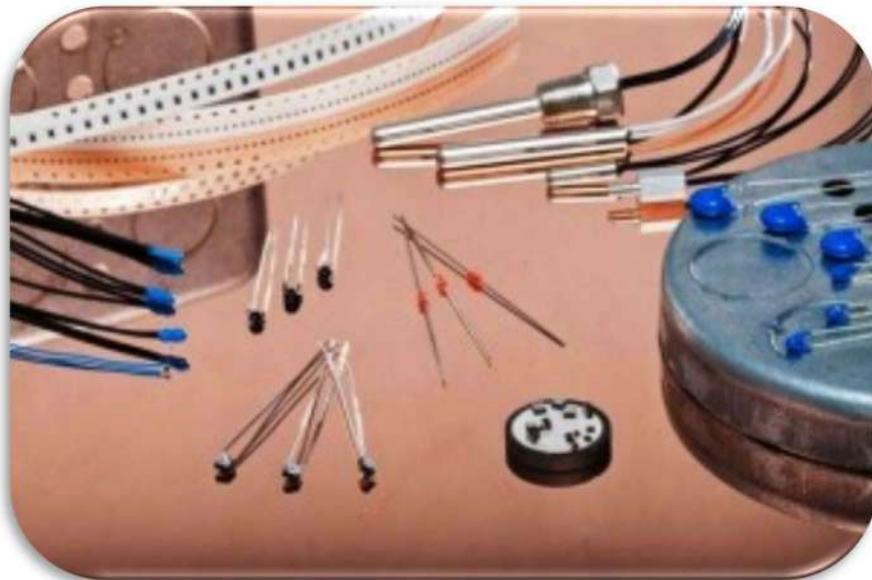


Figura 1.18 Diferentes tipos de termistores según su aplicación (AMETHERM, 2018)

Los termistores NTC son resistencias no lineales, que alteran sus características de resistencia con la temperatura. La resistencia de NTC disminuirá a medida que aumenta la temperatura (Figura 1.19), la manera en que disminuye la resistencia está relacionada con una constante conocida en la industria electrónica como beta, o β , que se mide en °K.

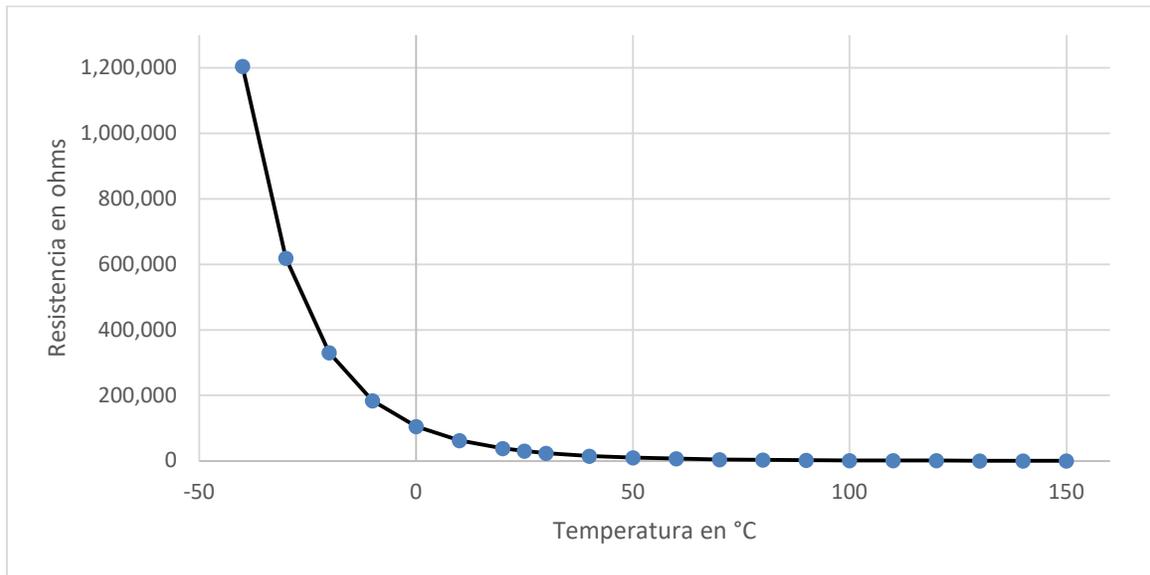


Figura 1.19 Respuesta del termistor en relación con la temperatura y la resistencia (AMETHERM, 2018)

Ecuación Steinhart y Hart para Termistores NTC

La ecuación de Steinhart y Hart es la mejor expresión matemática basada en la respuesta del termistor NTC para la obtención de la temperatura en función de la resistencia mediante un programa de cómputo.

$$T = \frac{1}{A + B * \ln(R) + C[\ln(R)]^3} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

T : es la temperatura en grados Kelvin

R : es la resistencia en ohms

A, B y C : son los coeficientes de tres temperaturas de calibración

A, B y C , se calculan mediante la resistencia en tres puntos de temperatura, las tres temperaturas deben estar separadas mínimo por 10 °C, con estas se resuelven los coeficientes con tres ecuaciones simultaneas.

$$\frac{1}{T} = A + B * \ln(R_1) + C[\ln(R_1)]^3 \quad \text{Ec. 29}$$

$$\frac{1}{T} = A + B * \ln(R_2) + C[\ln(R_2)]^3 \quad \text{Ec. 30}$$

$$\frac{1}{T} = A + B * \ln(R_3) + C[\ln(R_3)]^3 \quad \text{Ec. 31}$$

Se calculan A , B y C :

$$L_1 = \ln(R_1), L_2 = \ln(R_2), L_3 = \ln(R_3)$$

$$Y_1 = \frac{1}{T_1}, Y_2 = \frac{1}{T_2}, Y_3 = \frac{1}{T_3} \quad \text{Ec. 32}$$

$$\gamma_2 = \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1}, \gamma_3 = \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1} \quad \text{Ec. 33}$$

$$\Rightarrow C = \left(\frac{Y_3 - Y_2}{L_3 - L_2} \right) (L_1 + L_2 + L_3)^{-1} \quad \text{Ec. 34}$$

$$\Rightarrow B = \gamma_2 - C(L_1^2 + L_1L_2 + L_2^2) \quad \text{Ec. 35}$$

$$\Rightarrow A = Y_1 - L_1(B + CY_1^2) \quad \text{Ec. 36}$$

Conociendo A , B , C y la resistencia se utiliza la ecuación 1.28 en el programa del microprocesador.

1.4.11 Sensor de presión MP3V5010DP

Los transductores piezorresistivos de la serie MP3V5010 (Figura 1.20) son de vanguardia. Son sensores de presión de silicio monolíticos diseñados para una amplia gama de aplicaciones, pero particularmente en aquellas que emplean un microcontrolador o microprocesador con entradas analógicas a digital. Este transductor combina técnicas avanzadas de micro mecanización, metalización de película delgada y procesamiento bipolar para proporcionar una alta precisión y salida de señal de salida analógica de nivel que es proporcional a la presión aplicada (NPX, 2018).

Sus principales características son:

- 5.0% de error máximo sobre 0 ° a 85 ° C
- Ideal para sistemas basados en microprocesadores o microcontroladores
- Temperatura compensada por encima de –40 ° a + 125 ° C
- Paquete de montaje superficial termoplástico (PPS)
- Medidor de tensión de esfuerzo de silicona patentado
- Voltaje de operación 3.3V
- Rango de operación de 0 a 10 kPa
- Rango de voltajes de salida de 0.38V a 3.08V (NPX, 2018)



Figura 1.20 Sensor de Presión MP3V5010DP (NPX, 2018)

1.5 MEDICIÓN DE VOLUMEN POR PRESIÓN Y TEMPERATURA

El cálculo del volumen dentro del recipiente es mediante la Ley general de los gases (Brown et al., 2014 y Chang, 1999), considerando, la presión, temperatura y volumen inicial. Se calcula el volumen final mediante la ecuación 4 y 5 si hay desplazamiento de líquido se tiene que remplazar V_1 por V_{1+} :

$$V_2 = V_1 * \left(\frac{P_{atm+1}}{P_{1+1}} * \frac{T_2}{T_1} \right) \quad \text{Ec. 37}$$

Dónde:

V_2 = Volumen final de mezclas de gases en el recipiente

V_1 = Volumen inicial de mezclas de gases en el recipiente

P_{atm} = Presión atmosférica inicial

P_1 = Presión final en el sistema

T_2 = Temperatura final en Kelvin

T_1 = Temperatura final en Kelvin

$$V_{1+} = V_1 + V_{desplazado} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

V_{1+} = Volumen inicial más el volumen desplazado

V_1 = Volumen inicial de mezclas de gases en el recipiente

$V_{desplazado}$ = Volumen desplazado

1.6 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

Los acondicionadores de señal son circuitos que convierten los parámetros eléctricos de salida de los transductores en una señal eléctrica (generalmente corriente, voltaje o frecuencia) que se puede medir fácilmente.

Son todas aquellas transformaciones que deben realizarse sobre las señales eléctricas que resultan en la salida del transductor, y que son previas al procesado para extraer la información que se busca (Creus, 2011; Granada y Mediavilla, 2009; Pallas, 2005).

El conjunto transductor-acondicionador es la interface entre la variable física y la entrada del circuito electrónico que vaya a procesar la información (por ejemplo, el convertidor A/D de un microprocesador).

1.6.1 Amplificador operación de precisión

Los amplificadores operacionales de precisión de ultra bajo ruido en el orden de los 9 nV, son recomendados en el acondicionamiento de señal de los detectores termopila, por el bajo voltaje que generan y su alta impedancia de salida, el amplificador ADA4528-EP (Figura 1.21), ofrece una alta estabilidad, auto ajuste de ruido a cero, operación fuente simple hasta 5V, no requiere de componentes externos para la estabilización y cancelación de ruido, el rango de operación en temperatura es amplio de -55 °C a 125°C, viene en un encapsulado tipo SOIC de 5mm x 5mm, lo que permite reducir al máximo los circuitos impresos y reducir aún más el ruido (AD, 2018).

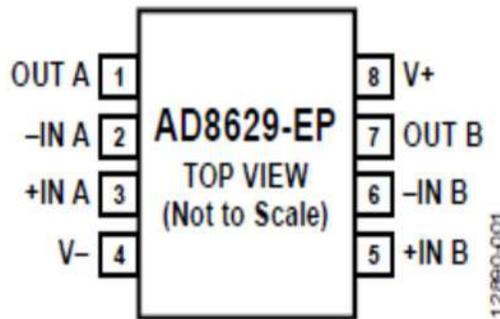


Figura 1.21 Amplificador Operacional AD8629-EP

Otras características importantes de este amplificador es su bajo consumo de energía de 1 mA y alta impedancia de salida 100 KΩ

1.6.2 Acondicionador de señal para aplicaciones de sensores NDIR

El acondicionador de señales para sensores NDIR de Texas Instruments modelo LMP91051, fue diseñado para proporcionar la mejor interconexión entre el Sensor NDIR a un microprocesador, ver Figura 1.22 (TI, 2013).

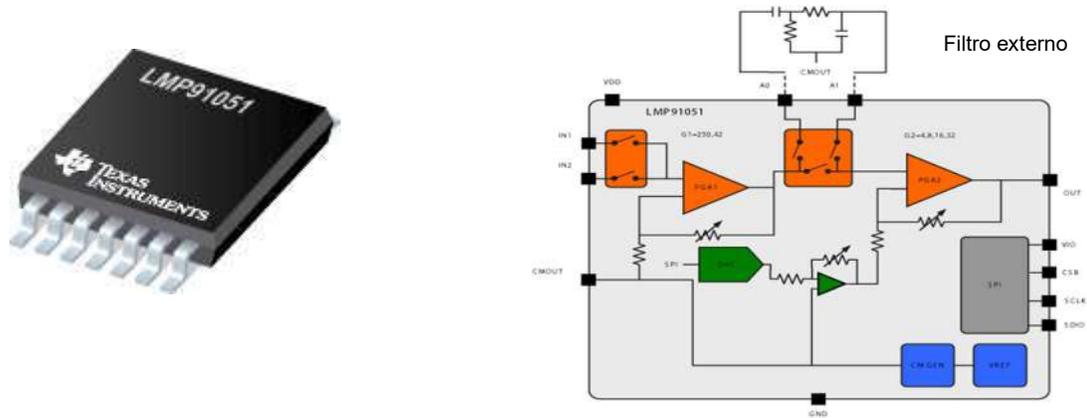


Figura 1.22 Acondicionador de señal para aplicaciones de sensores NDIR
Texas Instruments LMP91051

Viene integrado con dos amplificadores operacionales con ganancia programable, cancelación de señal oscura, soporta filtraje externo y tiene integrado un convertidor de digital a análogo (DAC), para generar la modulación, su configuración es mediante el protocolo de comunicación I²C (TI, 2013).

1.7 ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO

Es el conjunto de transformaciones a que debe someterse la señal eléctrica para extraer de ella la información que se busca. El procesamiento de la señal suele contener muy diversas operaciones, ya sean lineales, no lineales, de composición de múltiples señales, o de procesamiento digital de las señales (Kalaiarasi, 2012; Granada y Mediavilla, 2009).

1.7.1 Convertidor Analógico a Digital ADS1115

El convertidor analógico a digital ADS1115 de Texas Instruments tiene las siguientes características: Es ultra pequeño 2mm x 1.5 mm x 0.4mm; rango amplio de voltaje de alimentación de 2.0 V a 5.5 V; bajo consumo de energía tan solo 150 μ A, velocidad de muestreo programable de 8 SPS (Muestras por segundo) a 860 SPS, voltaje de referencia

interno para acondicionamiento de señal, entradas simples o diferenciales, 16 bits de resolución, protocolo de comunicación I²C, error de ganancia típico de 0.01% ver Figura 1.23 (Texas Instruments, 2018).



Figura 1.23 Convertidor analógico a digital ADS1115 (Texas Instruments, 2018)

1.7.2 Procesamiento de datos con módulo de desarrollo MSP430F5529

El módulo de desarrollo MSP430F5529 (Figura 1.24) fue diseñado para procesar señales de sensores, y específicamente para NDIR. Las características principales que posee son las siguientes: Procesador de 16 bits con 128 KB de memoria flas de programa, 8 KB de RAM, velocidad de procesamiento hasta 25 MHz, convertidor analógico a digital de 12 bits, 4 temporizadores/contadores, 20 pines de entrada y salida y puertos de comunicación I²C, UART y SPI.

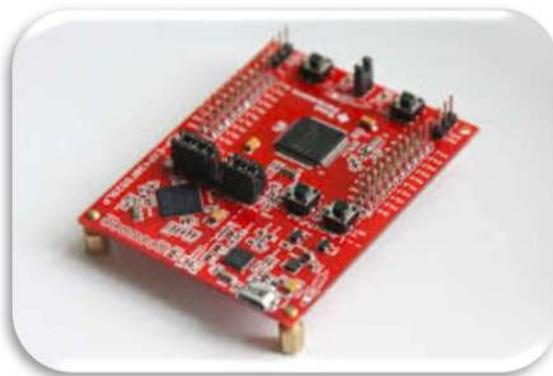


Figura 1.24 Modulo de desarrollo MSP430F5529LP

1.7.3 Procesamiento de datos con Raspberry Pi 3

El Raspberry Pi 3 es una mini PC con procesamiento de datos con las siguientes características: Chipset Broadcom BCM2387 con cuatro núcleos ARM Cortex-A53 a 1.2 GHz, memoria RAM de 1 GB, memoria de almacenamiento micro SD de hasta 128 Gb, módulos ethernet, bluetooth 4.1 y 802.11n Wireless LAN integrados, Cuatro puertos USB 2.0, salida de Video HDMI, salida de audio y video compuesto, 40 GPIO, sistemas operativos disponibles Linux Ubuntu y Windows IOT, dimensiones de la tarjeta de 8.5 por 5.3 cm, ver Figura 1.25 (Raspberry, 2016).

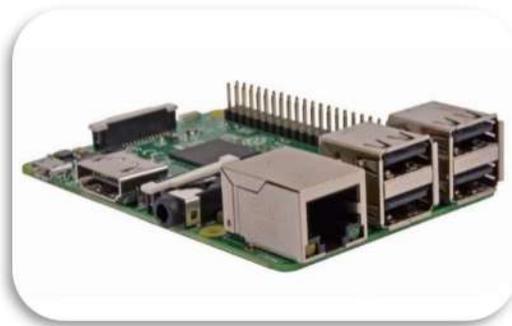


Figura 1.25 Raspberry Pi 3 (Raspberry, 2016)

Con estas características se puede tener una minicomputadora con dimensiones pequeñas y con una gran capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos a un bajo costo (Raspberry, 2016).

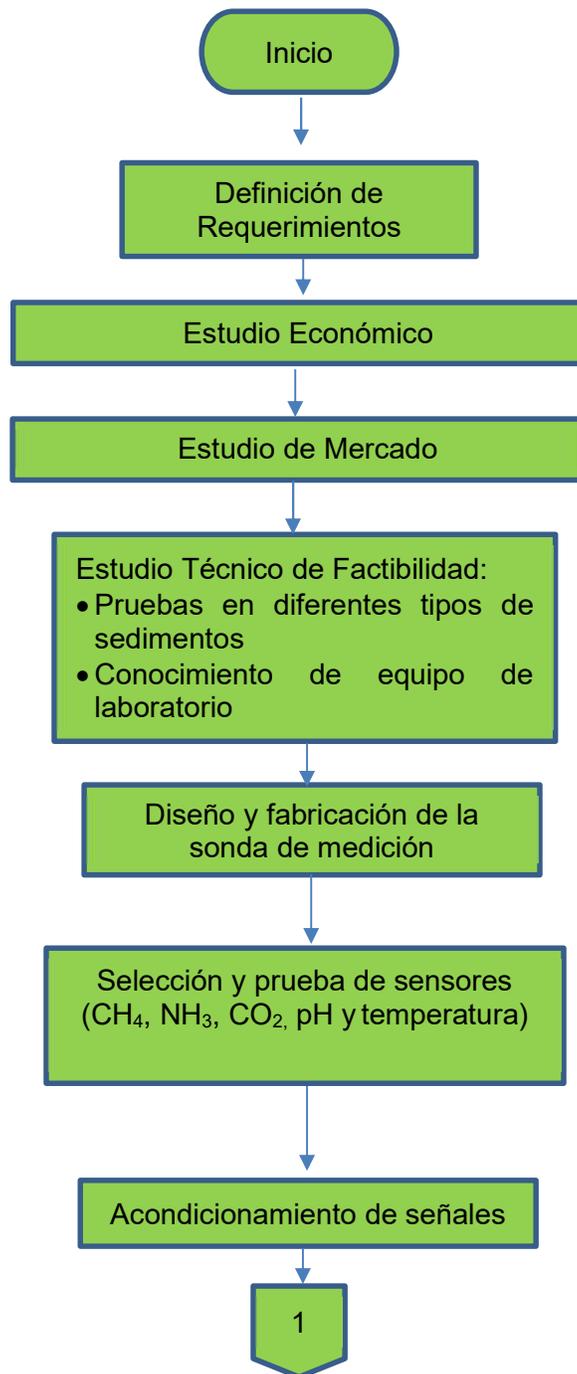
1.7.4 Sistema operativo Windows IOT y programación XAML y C#

Windows IOT Core, es una versión del sistema operativo Windows 10 que fue optimizado para pequeños dispositivos con o sin pantalla como los Raspberry, Arrow DragonBoard y otros. Windows IOT Core utiliza la enriquecida y extensiva plataforma universal de Windows (UWP) que es una interfaz de programación de aplicaciones (de sus siglas en ingles API) para crear grandes y poderosas soluciones prácticamente en cualquier dispositivo (Microsoft, 2016).

Windows 10 y IOT Core, se programan con dos lenguajes integrados en Visual Studio 2015 en todas sus versiones, para la interface gráfica basada en páginas web, con XAML (de sus siglas en inglés eXtensible Application Markup Language, Lenguaje Extensible de Formato para Aplicaciones) y el procesamiento de datos en C#, que es un lenguaje derivado de C++, simplificado para agilizar el desarrollo de aplicaciones (Microsoft, 2016).

2 PARTE EXPERIMENTAL

En la Figura 2.1 se muestra el desarrollo experimental para el “DISPOSITIVO PARA LA EVALUACIÓN *in situ* DE CH₄, CO₂, O₂, NH₃, pH Y TEMPERATURA EN SEDIMENTOS”



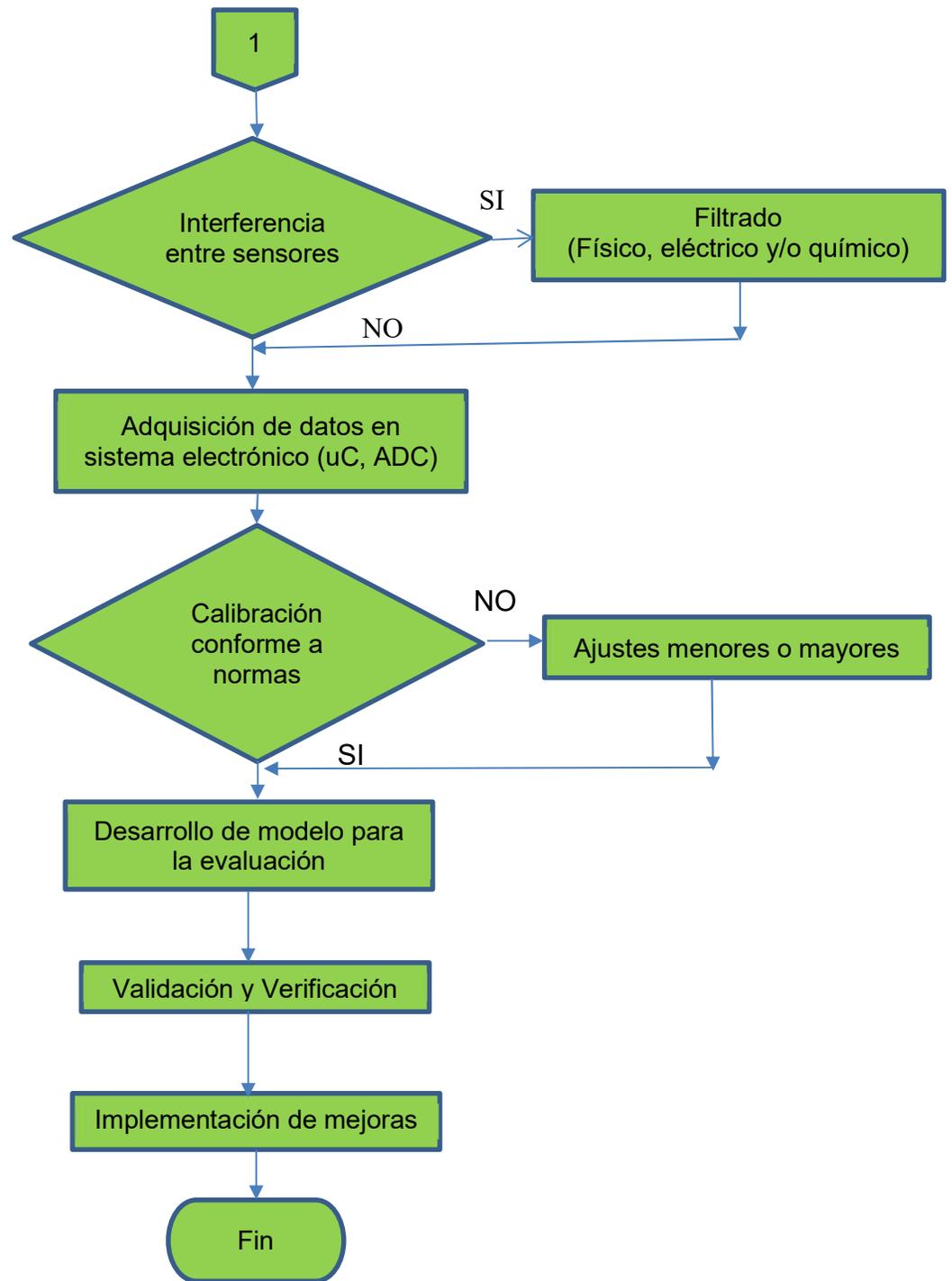


Figura 2.1 Diagrama del Desarrollo Experimental

2.1 Definición de Requerimientos

Se definieron los parámetros conforme a las necesidades de la Línea de Investigación Tratamiento de Contaminantes y Gestión Ambiental del Instituto Tecnológico de Toluca, basados en las normas mexicanas y métodos internacionales para la determinación de contaminantes en sedimentos.

2.2 Estudio de Mercado

Se aplicó la encuesta del Anexo 1, a investigadores de los centros de investigación que pudieran tener interés en un dispositivo con los parámetros propuestos, para la determinar si el equipo les será útil en estudios de campo.

2.3 Estudio Económico

Se realizó un estudio de los costos aproximados para la fabricación del dispositivo de medición, como un producto ya disponible en el mercado y se comparó con los equipos similares existentes.

2.4 Estudio Técnico de Factibilidad

Se realizó el estudio de mecánica del sedimento para determinar la profundidad de penetración con dos diámetros diferentes 1.5" y 2" a una fuerza de 20 kgf, en tres cuerpos de agua, Laguna de Chimaliapan, Estado de México; Playa Pescadores, Quintana Roo; y en la Laguna de Cuitzeo, Michoacán.

Como no existe un método normado para estudio mecánico en sedimentos que no sea a través de martilleo o taladro, se desarrolló un método para para el muestreo sin afectar los gases disueltos en sedimentos.

Se recolectaron muestras de sedimentos del Rio Lema y se extrajeron los gases con cromatógrafo de gases del laboratorio de tecnologías sustentables de la UAM unidad Azcapotzalco, con el fin de determinar la factibilidad y los parámetros de volumen del sensor de gases, el volumen del sistema de separación y medición de gases, los valores de calibración de los sensores de gases cero y span.

2.5 Diseño del prototipo (sonda)

La sonda es el dispositivo mecánico que extrae la muestra de los sedimentos. Se elaboraron tres diseños básicos, en base a los requerimientos, estudio de mercado, estudio económico y estudio técnico de factibilidad. Una vez definido el diseño del prototipo se fabricó la sonda, con maquinado CNC, se realizaron pruebas en sedimentos limosos y arcillosos del rio Lerma hasta 50 cm de profundidad.

2.6 Selección y prueba de sensores

Se hicieron pruebas con diversos tipos de sensores existentes en el mercado con las características deseadas, para estado gaseoso y ambiente acuoso, con el fin de analizar su comportamiento electroquímico, que sea el adecuado para trabajar *in situ*.

2.7 Acondicionamiento de señales

Se utilizaron los métodos de acondicionamiento de señales mediante el uso de amplificadores operacionales de instrumentación de la más alta calidad a cada sensor de

CH₄, CO₂, O₂ disuelto, NH₃, H₂S, pH, temperatura y conductividad. Con el fin de tener la máxima eficiencia, bajo ruido y mayor precisión en el muestreo.

2.8 Adquisición de datos

La adquisición de datos se hizo con convertidores analógicos digitales, de bajo ruido y de alta resolución de 12 bits.

El procesamiento se está elaborando con procesador de cuatro-núcleos ARM Cortex-A53 de velocidad de 1,2 GHz (Raspberry Pi 3) y procesadores Texas Instruments de la familia MPS 430 de 32 bits, ya que los modelos matemáticos de FFT o FDT, filtraje, entre otros requieren de alta velocidad de procesamiento y se requiere para cada sensor.

Integración de Componentes: en la integración del prototipo con los sensores y el sistema electrónico fue acorde a las tarjetas o módulos de adquisición de datos, a las especificaciones y condiciones ambientales que permitan el trabajo *in situ*.

2.9 Calibración con forme a las Normas y especificaciones

La calibración es acuerdo a las normas y las especificaciones, la calibración cero de los gases se hizo con N₂ y el rango mejor conocido como "SPAN", se hizo conforme a niveles de concentración, para CH₄, con gas patrón del 50% (Vol.), el CO₂ con 35% (Vol.), O₂ con 4% (Vol.), NH₃ con 5 ppm. La calibración de pH con soluciones buffer de 4, 7, 10 pH y la temperatura según las normas mexicanas.

2.10 Desarrollo del modelo para la evaluación de datos

Con la información obtenida del prototipo, se desarrolló un software que verifica los niveles de los parámetros, comparándolos con los límites establecidos en las normas, con el fin de determinar los grados de afectación o remediación según sea el caso, por medio de una pantalla se muestran los niveles de cada parámetro y se marca en verde lo que está dentro de los límites y en rojo lo que este fuera de los mismos y se guarda la información en una base de datos, para la elaboración de los inventarios de GEI y control estadístico de los demás parámetros.

2.11 Validación y verificación

Para la validación del equipo, se hicieron mediciones a diferentes concentraciones de gases, para, el error, precisión, exactitud, robustez, la desviación estándar, la confiabilidad del dispositivo y la comparación con otros dispositivos similares y con parámetros individuales ya que en el mercado no hay uno con todos los parámetros de éste. Se hicieron los ajustes menores o mayores para lograr una confiabilidad igual o mayor al 95%.

2.12 Implementación de mejoras

Se rediseñó el dispositivo para que tenga la capacidad de operar en sedimento, cuerpo de agua o en un medio atmosférico, con lo que se incrementa su uso en otras aplicaciones y tiene un mayor impacto, ya que se pueden monitorear grados de afectación, o remediación y realización de inventarios de GEI en cualquier tipo de ambiente.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS

Con los responsables de la Línea de Investigación Tratamiento de Contaminantes y Gestión Ambiental del instituto Tecnológico de Toluca, se definieron los parámetros conforme a la necesidad de desarrollar un dispositivo de medición *in situ* de CH₄, CO₂, O₂ disuelto, NH₃, pH y Temperatura en sedimentos, basado en las normas mexicanas y métodos internacionales.

En la Tabla 3.1 se muestran las especificaciones técnicas del dispositivo, de acuerdo a las normas vigentes.

Tabla 3.1 Especificaciones dispositivo propuesto

| | | |
|-------------------------|--------------|----------------------|
| CH ₄ | 0 – 100% | Lectura Máxima |
| CO ₂ | 0 -100% | Lectura Máxima |
| NH ₃ | 0 - 1000 ppm | ATSDR* |
| O ₂ disuelto | 0 – 25 mg/L | Goyenola, 2007 |
| pH | 0 – 14 pH | NMX-AA-008-SCFI-2011 |
| Temperatura | -15° – 60°C | NMX-AA-007-SCFI-2013 |

*ATSDR: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de Estados Unidos

Además, características como portabilidad, bajo costo, precisión, exactitud, robustez, materiales resistentes a la corrosión y ahorro de energía.

3.2 ESTUDIO DE MERCADO

En México están inscritos en el Sistema Nacional de Investigadores 28,633 investigadores, de los cuales 313 tienen la disciplina de medio ambiente (CONACYT, 2018).

Se aplicó la encuesta del Anexo 1 a 16 Investigadores de algunas instituciones como la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), y el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT). En la Tabla 3.2 se muestran los resultados.

Tabla 3.2 Resultado de la encuesta de factibilidad

| Pregunta | Si | No | Comentarios |
|--|----|----|---|
| ¿Conoce un equipo en el mercado que tenga todos estos parámetros de medición en el mismo equipo? | 2 | 14 | Vernier LabQuest, otro un Orión, el equipo Hach y accesorios, para aguas profundas el Hydro Lab, entre otros, el GPS es aparte |
| ¿Considera útil un equipo con estas capacidades de medición? | 15 | 1 | |
| ¿Adquiriría un equipo con estas funciones? | 15 | 1 | Depende del precio y lo practico que sea la operación |
| ¿Quitaría o pondría más parámetros de medición? ¿Cuáles? | 2 | 14 | SDT, Alcalinidad, Dureza, Salinidad, Fluoruros, el potencial redox (ORTREP), y de ser posible nitratos, nitritos, sulfatos y fosfatos. |
| Comentarios: | 3 | 13 | Es una buena propuesta, sería bueno considerar que para todos los parámetros requieren diferentes sondas y con esto es complicado el manejo para el traslado del equipo, soluciones buffer etc., con esto, el equipo en lugar de facilitarte el trabajo lo complica. El costo debe ser equivalente a un par de equipos portátiles que existen en el mercado para que resulte atractivo su adquisición. Sería de gran utilidad y desde luego lo adquirirá para mis estudios en agua sedimentos, suelos Lagunas humedales, lixiviados entre otros |

El tamaño de la muestra se calculó con la siguiente ecuación estadística (Benassini, 2009):

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (N - 1)) + k^2 * p * q} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra

N: es el tamaño de la población o universo (número total de posibles encuestados).

k: Nivel de confianza.

Los valores k más utilizados y sus niveles de confianza son (Tabla 3.3):

Tabla 3.3 Resultado de la encuesta de factibilidad, nivel de confianza (Benassini, 2009)

| | | | | | | | |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|
| k | 1,15 | 1,28 | 1,44 | 1,65 | 1,96 | 2 | 2,58 |
| Nivel de confianza | 75% | 80% | 85% | 90% | 95% | 95,5% | 99% |

p: es la proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio.

q: es la proporción de individuos que no poseen esa característica, es decir, es 1-p.

Se consideró un nivel de confianza de 80%, con un error de 10%, con un 90% de posesión de características de los entrevistados y un 10% que no poseen las características del uso del dispositivo. Por lo que se tuvo un total de número de encuestas a realizar de:

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (N - 1)) + k^2 * p * q} = \frac{1.28^2 * 0.9 * 0.1 * 310}{(0.1^2 * (310 - 1)) + 1.28^2 * 0.9 * 0.1} = 14$$

$$n = 14 \text{ encuestas}$$

Ec. 40

Se calculó el porcentaje de aceptación (Benassini, 2009):

$$\% \text{ de Aceptación} = \frac{\text{Respuestas afirmativas}}{\text{No. de Encuestados}} \times 100 = \frac{15}{16} \times 100 = 93.75\% \quad \text{Ec. 41}$$

Se calculó la probabilidad de venta (Benassini, 2009):

$$\text{probabilidad de venta} = \frac{\text{Posibles compradores}}{\text{No. de Encuestados}} \times 100 = \frac{15}{16} \times 100 = 93.75\% \quad \text{Ec. 42}$$

Considerando el nivel de confianza del 80% y un error del 10% los resultados son aceptación 93.75% * 0.8 = **75%** y la probabilidad de venta igual de un **75%**, esto quiere decir que se tendría una venta probable de:

$$\text{Venta probable} = 310 \text{ prototipos} * 0.75 = \mathbf{233 \pm 23 \text{ dispositivos}} \quad \text{Ec. 43}$$

Los resultados de la encuesta indican que el desarrollo del dispositivo es factible ya que tiene una aceptación probable del 75% y probabilidad de venta de 233 ± 23 dispositivos. Hay áreas de oportunidad a futuro con las mejoras que proponen los encuestados, con lo que se asegura la permanencia en el mercado. Los dispositivos en el mercado no poseen todos los parámetros propuestos, no tienen GPS y carecen de bases de datos de alto volumen.

3.3 ESTUDIO ECONÓMICO

Se hizo un estudio de costos aproximado, el precio al usuario final aproximado es de \$107,000 pesos con sonda incluida (incluye el 110% de ganancia, impuestos y gastos de importación). Comparado con el GEM 5000 que tiene un precio en el mercado de \$249,018.75 pesos, será más económico el propuesto, más versátil y con mayor número de accesorios, en ninguno incluyen la sonda de muestreo, se vende por separado.

Con una producción de 233 dispositivos a un costo de 107,000 pesos, se tendría una venta de 24,931,000.00 pesos, teniendo una ganancia neta de 13,715,936.40 pesos.

En cuanto al financiamiento del prototipo, se tuvo el apoyo con el proyecto financiado del Tecnológico Nacional de México, con Clave: 5891.16-P.

3.4 ESTUDIO TÉCNICO DE FACTIBILIDAD

El estudio de factibilidad técnica se dividió en dos fases: Estudio de mecánica del sedimento y Extracción y medición de gases de sedimentos del río Lerma.

3.4.1 Estudio de Mecánica del sedimento

El experimento consistió en introducir en los puntos de medición definidos en las tres entidades del país, cada uno de los tubos, se les aplicaron 20 kgf, registrándose las profundidades de penetración en el sedimento, y se recolectaron muestras de los sedimentos de aproximadamente 300 gramos en bolsas ziplog.

En la Tabla 3.4 se muestran los tubos de prueba y celda de carga.

Tabla 3.4 Tubos de prueba y celda de carga

| Cant. | Terminación recta con chaflán 30° | Número | Imagen |
|-------|---|--------|---|
| 1 | Tubo de PVC de 1.5" | 1 |  |
| 1 | Tubo de PVC de 2.0" | 2 |  |
| | Terminación en punta de 30° con chaflán 30° | | |
| 1 | Tubo de PVC de 1.5 | 3 |  |
| 1 | Tubo PVC de 2.0" | 4 |  |
| 1 | Celda de carga de 50 kg ± 1%. | |  |

Se seleccionaron cada uno de los puntos en Google Earth, en el Estado de México, en el Estado de Michoacán y en el Estado de Quintana Roo, de manera que la información sea representativa en diferentes tipos de sedimentos en el centro y sur del país. En el Estado de México se seleccionó la Laguna de Chimaliapan, se eligieron 3 puntos por ser de interés local, es un cuerpo de agua protegido, donde llegan 4 descargas de aguas residuales municipales, al menos una de ellas industrial. Después de tomar cada muestra se lavaron con agua limpia y el cepillo, con el de no contaminar las muestras.

Las mediciones de la bitácora se transcribieron a la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Mediciones en campo para determinación del promedio de penetración y los valores máximos y mínimos

| Punto 1, Laguna de Chimaliapan (8/04/2016) | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Tubo | Presión (kgf/cm²) | Profundidad (cm) | Coordenadas |
| 1 | 7.6 | 30.6 | 19° 15' 1.71" N |
| 2 | 5.64 | 25.3 | 99° 29' 10.78" O |
| 3 | 7.6 | 30.2 | |
| 4 | 5.64 | 24.6 | |
| Punto 2, Laguna de Chimaliapan (8/04/2016) | | | |
| Tubo | Presión (kgf/cm²) | Profundidad (cm) | Coordenadas |
| 1 | 7.6 | 21.2 | 19° 15' 0.92" N |
| 2 | 5.64 | 9.7 | 99° 29' 12.02" O |
| 3 | 7.6 | 10.6 | |
| 4 | 5.64 | 5.8 | |
| Punto 3, Laguna de Chimaliapan (8/04/2016) | | | |
| Tubo | Presión (kgf/cm²) | Profundidad (cm) | Coordenadas |
| 1 | 7.6 | 15.0 | 19° 14' 57.68" N |
| 2 | 5.64 | 5.6 | 99° 29' 16.59" O |
| 3 | 7.6 | 11.6 | |
| 4 | 5.64 | 5.4 | |
| Punto 4, Laguna de Cuitzeo (7/5/2016) | | | |
| Tubo | Presión (kgf/cm²) | Profundidad (cm) | Coordenadas |
| 1 | 7.6 | 8.5 | 19° 57' 29.36" N |
| 2 | 5.64 | 6.2 | 101° 8' 11.11" O |
| 3 | 7.6 | 6.8 | |
| 4 | 5.64 | 4.5 | |
| Punto 5, Playa Pescadores, Quintana Roo, (25/3/2016) | | | |
| Tubo | Presión (kgf/cm²) | Profundidad (cm) | Coordenadas |
| 1 | 7.6 | 13.2 | 20° 12' 30.96" N |
| 2 | 5.64 | 8.4 | 87° 25' 48.08" O |
| 3 | 7.6 | 11.5 | |
| 4 | 5.64 | 6.4 | |

Calculo de áreas y presiones

Los tubos de 1.5" y 2" se midieron con un vernier Mitutoyo digital, modelo CD-6" CSX, se obtuvieron: Diámetro exterior 1.5" = 4.066 cm, diámetro interior 1.5" = 3.63 cm y diámetro exterior 2" = 5.03 cm, diámetro interior 2" = 4.56 cm, para calcular las áreas de ambos diámetros y el área total se obtiene de:

$$A_{\text{diametro exterior}} = \pi * r^2 = \pi * 2.033^2 = 12.98 \text{ cm}^2 \quad \text{Ec. 44}$$

$$A_{\text{diametro Interior}} = \pi * r^2 = \pi * 1.815^2 = 10.35 \text{ cm}^2 \quad \text{Ec. 45}$$

$$A_{\text{Total 1.5''}} = A_{\text{diam. ext.}} - A_{\text{diam. Int.}} = 12.98 \text{ cm}^2 - 10.35 \text{ cm}^2 = 2.63 \text{ cm}^2 \quad \text{Ec. 46}$$

$$A_{\text{diametro exterior}} = \pi * r^2 = \pi * 2.515^2 = 19.87 \text{ cm}^2 \quad \text{Ec. 47}$$

$$A_{\text{diametro Interior}} = \pi * r^2 = \pi * 2.28^2 = 16.33 \text{ cm}^2 \quad \text{Ec. 48}$$

$$A_{\text{Total 2''}} = A_{\text{diam. ext.}} - A_{\text{diam. Int.}} = 19.87 \text{ cm}^2 - 16.33 \text{ cm}^2 = 3.54 \text{ cm}^2 \quad \text{Ec. 49}$$

Las presiones sobre el tubo de 1.5" (4.066cm) y 2" (5.03 cm) se obtiene de:

$$P_{1.5''} = \frac{F}{A} = \frac{20\text{kgf}}{2.63\text{cm}^2} = 7.6 \text{ kgf/cm}^2 \quad \text{Ec. 50}$$

$$P_{2''} = \frac{F}{A} = \frac{20\text{kgf}}{3.54\text{cm}^2} = 5.64 \text{ kgf/cm}^2 \quad \text{Ec. 51}$$

Donde P = presión ejercida

F= Fuerza máxima ejercida

A= Área total del tubo de los tubos

Los datos de la Tabla 3.5 se Graficaron, ver Figura 3.1

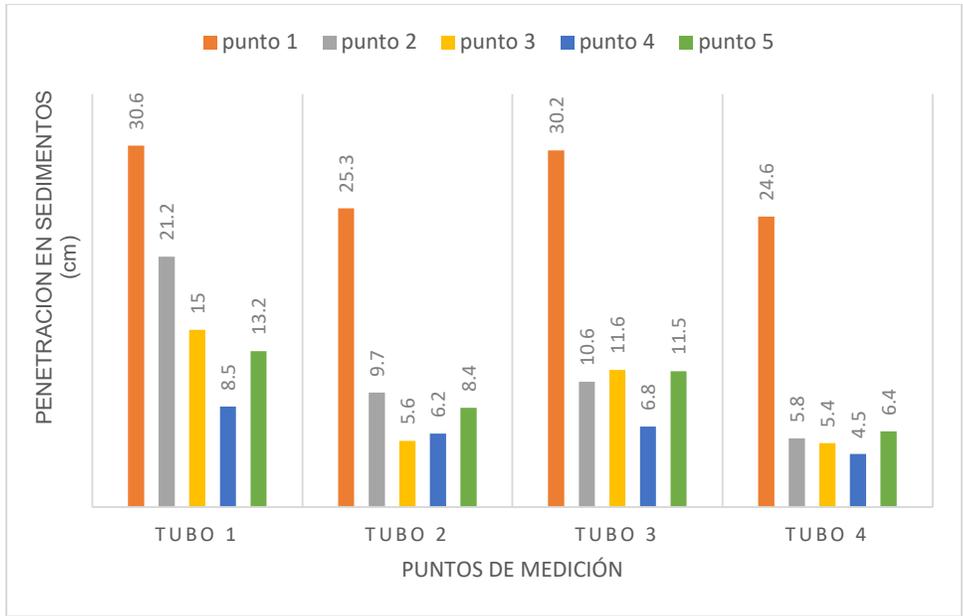


Figura 3.1 Gráfica de penetraciones por tubo

La Gráfica anterior muestra los 5 puntos de muestreo para cada tubo, donde se aprecia que el tubo uno, tiene mayor penetración en los sedimentos que los otros, esto es debido a que tiene menor superficie de contacto que los demás, se puede apreciar además que en la Laguna de Chimaliapan, tiene mayor penetración debido a las propiedades del sedimento, la Laguna de Cuitzeo es donde más resistencia se encontró, esto es debido a la compactación.

Se calculó el promedio de penetración por tubo ver Figura 3.2.

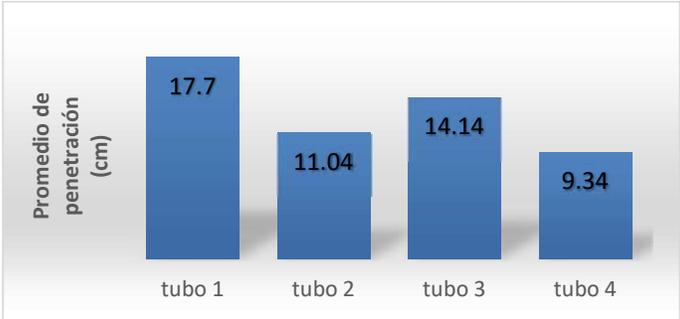


Figura 3.2 Gráfica de la penetración promedio por tubo

En la gráfica anterior se promediaron las penetraciones por tubo, de todos los puntos de medición, se aprecia más claramente que el tubo uno con menor superficie de contacto es mejor que los demás, los tubos con terminación en punta son menos eficientes que los rectos, debido a que aumenta la superficie de contacto.

Se calculó en Excel la desviación estándar como se muestra en la figura 3.3.

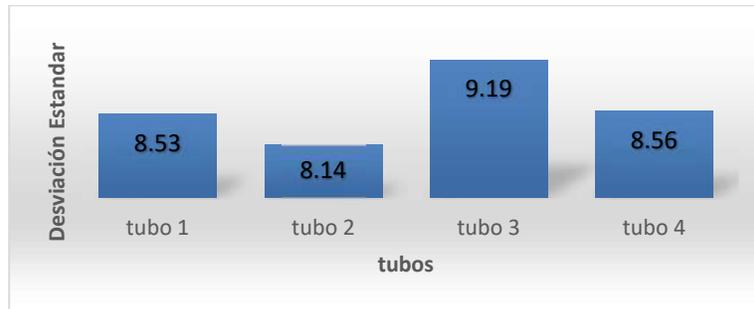


Figura 3.3 Desviación estándar de cada tubo

Como se observa en la gráfica anterior las desviaciones son muy elevadas, por lo que no es fácil desarrollar una ecuación que determine con precisión la penetración de un tubo en cualquier lugar. Esto es debido a que, aunque la medición se haga en el mismo sitio con algunos centímetros de separación la penetración será muy diferente ya que la composición física de cada punto es muy variada, bolsas de plástico, hojas, ramas, piedras, etc.; por lo que se demuestra que entre menor superficie de contacto se tenga, mayor será la penetración en el sedimento y viceversa.

El tipo y tamaño del sedimento se determinó con la observación de las muestras de cada punto en el laboratorio con un microscopio marca Nikon modelo YS2-T, ver Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Tamaño de partículas y clasificación del tipo de sedimento (USGS, 2003)

| | Laguna de Chimaliapan | Playa Pescadores | Lago de Cuitzeo |
|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Tamaño | 1.5 μm -30 μm | 142 μm -551 μm | 2.5 μm -36.7 μm |
| Tipo | Arcilla-Limo | Arena | Arcilla-Limo |

En resumen, la composición del sedimento es muy heterogénea, ya que en la misma zona de muestreo puede variar como se aprecia en los tres puntos de medición en la Laguna de Chimaliapan, sobre todo en áreas de descarga en donde puede haber partículas tan grandes como bolsas de plástico, ramas, botellas de vidrio, etc., es por eso que la desviación estándar es muy elevada de entre 8.14 a 9.19, hay que ser muy cuidadoso con la selección de puntos de medición para tener una muestra lo más homogénea que se pueda y para no dañar la sonda de muestreo.

Con Tubos de PVC de 1.5" y 2" de diámetro y grosor de 2 mm se tuvieron en promedio una penetración en el sedimento de 9.34 a 17.7 cm. Se concluye que, si se desea mayor profundidad, se requiere reducir el diámetro y el grosor de cedula.

3.4.2 Extracción y medición de gases de sedimentos del Río Lerma

Con la finalidad de justificar el proyecto, se realizó este experimento, que consistió en extraer los gases disueltos en los sedimentos extraídos del Río Lerma en el muestreo y al finalizar los experimentos de Actividad Metanogénica Específica (AME), por medio de ultrasonido y método tradicional.

Se desarrolló un recipiente de extracción ultrasónica en base al diseño de 200 mL de carga de muestra y 200 ml de cámara de gases (400 mL volumen total), el transductor de ultrasonido se aloja en una lámina de acero inoxidable 305, la tapa es de plástico con sellado hermético con doble válvula conforme al diseño, en este caso una de ellas se usó para extracción de la muestra del gas y la otra para interconexión con el frasco de desplazamiento ver Figura 3.4.

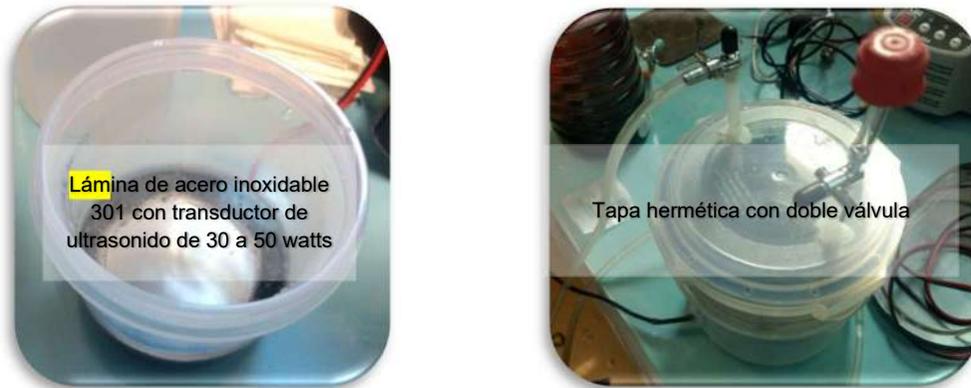


Figura 3.4 Recipiente de extracción de gases

Se hizo la extracción de gases de la muestra inicial del sedimento del Río Lerma (Figura 3.5), el tiempo de extracción fue de 15 minutos, el volumen fue de 38 mL. La temperatura inicial fue de 5°C y al finalizar el experimento 35°C el sedimento y la recámara de gases 17°C, el transductor piezoeléctrico aparte de generar las ondas de agitación ultrasónica, produce el calor necesario para calentar la muestra.

La extracción de gases de la muestra de gases del sedimento después del experimento AME, se realizó con el mismo sistema de extracción, los resultados fueron muy similares el goteo se detuvo en 16 minutos desplazando un volumen de 35 mL, la temperatura inicial 5°C, la final en 33°C en sedimento y 16.5 en la cámara de gases. Las lecturas de pH para el primer experimento fueron de 7.14 y del segundo 7.18.



Figura 3.5 Recipiente de extracción de gases en funcionamiento

Se tomaron de 2 a 3 muestras gas de cada extracción de 10 mL, así como de los reactores AME almacenado en el refrigerador, se almacenaron en tubos de ensayo de 15 mL (Figura 3.6), con 5 mL de solución NaOH, con rojo de metilo, para mantener conservados los gases en los tubos, para llevarlos el día 30 de noviembre al laboratorio de cromatografía de la UAM Azcapotzalco.

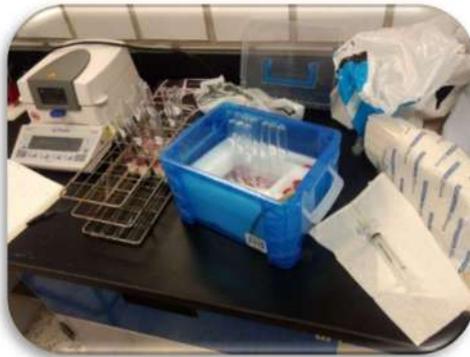


Figura 3.6 Tubos de ensayo con las muestras de gases

Cromatografía de gases de las muestras de los experimentos en el laboratorio Tecnologías Sustentables de la UAM Azcapotzalco

Las mediciones se realizaron con el cromatógrafo Agilent 7890B, la inserción de los gases de fue con una jeringa de 5 mL y con filtro de 340 nm, para evitar la introducción de humedad (Figura 3.7).

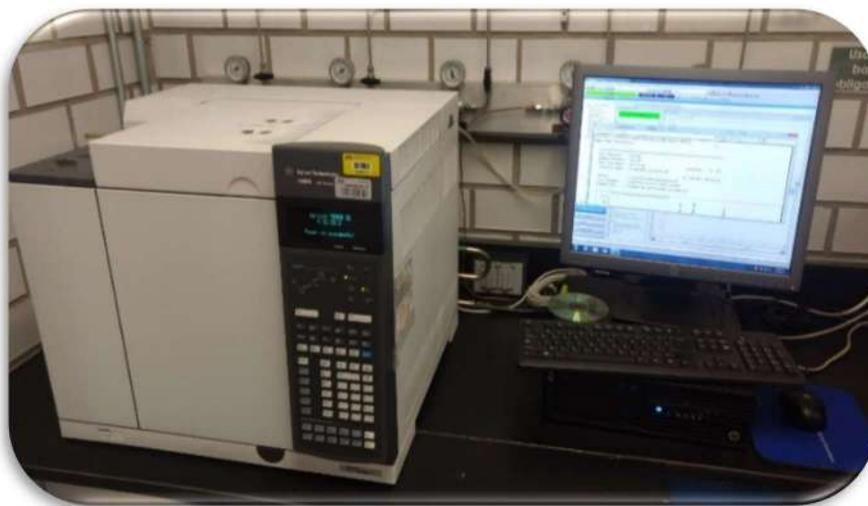


Figura 3.7 Cromatógrafo de gases Agilent 7890B de la UAM Azcapotzalco

Las concentraciones fueron las siguientes:

a) En el experimento AME como se puede ver en las gráficas (Figura 3.8), al igual que en el primero las desviaciones estándar dan un buen nivel de confiabilidad de los resultados del experimento, las concentraciones de metano a excepción del cuarto reactor también pueden considerarse como explosivas, también puede observarse que en los reactores 3 y 4 se encuentra un pequeño porcentaje de concentración de hidrógeno, por lo cual las concentraciones de metano se reducen un poco, lo cual indica la presencia de las bacterias *Clostridium* y *Streptomyces*, en el proceso de la degradación de la materia orgánica acumulada en los sedimentos del Río Lerma.

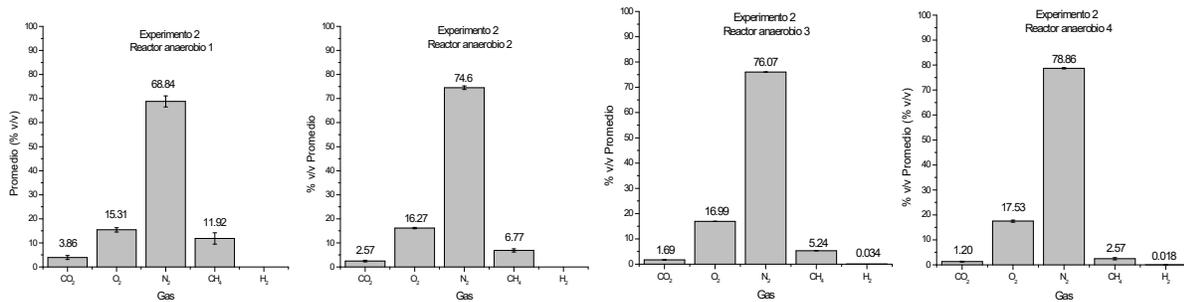


Figura 3.8 Gráficas de los resultados del cromatógrafo del primer experimento AME 2

b) Las concentraciones extraídas de los gases disueltos de los sedimentos en su fase inicial y final se pueden ver en las gráficas de la Figura 3.9, al igual que en los casos anteriores las desviaciones estándar indican un alto nivel de confiabilidad de confianza de los resultados de cromatografía, las concentraciones aparentemente son bajas pero en realidad no lo son porque están diluidas en el volumen inicial de la recámara de gases, más adelante se harán los cálculo de las concentraciones reales de los gases disueltos en los sedimentos.

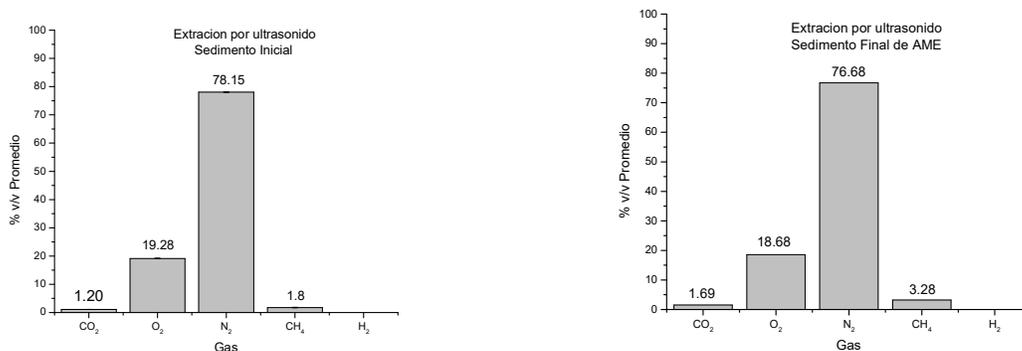


Figura 3.9 Gráficas de los resultados del cromatógrafo de extracciones de gases disueltos con ultrasonido

Con estos experimentos, se podrá determinar si el volumen del extractor de gases es el adecuado o habrá que modificarlo para un tamaño de muestra mayor o menor, con las concentraciones de los gases con los cálculos posteriores se determinaran los Span para el metano y para el dióxido de carbono, los gases restantes no se pudieron analizar por tener la columna adecuada.

Cálculo de volúmenes y concentraciones reales de los experimentos

Con la ley de los gases de Charles y Gay Lussac, se compensaron los volúmenes a la temperatura de 25°C:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Donde: V_1 = Volumen muestra

T_1 = Temperatura muestra en grados Kelvin

V_2 = Volumen a 25°C

T_2 = 25°C en grados Kelvin 298.15 K

Despejando volumen a 25°C la ecuación queda:

$$V_2 = \frac{V_1 * T_2}{T_1}$$

Las concentraciones de los gases de los tres experimentos se diluyeron con aire en las recamaras de gases, tanto en los reactores como en el separador de gases. Se determinaron las relaciones de las soluciones del volumen de aire en cada reactor entre el volumen de la muestra. La división entre estos dos volúmenes da la relación de la mezcla, que es el factor para determinar la concentración de gas real del volumen de gas desplazado en los tres experimentos, por cada reactor y extracción se obtuvo su factor de ajuste al valor real de concentración y del cual se determinaron los volúmenes de gases generados (Tabla 3.7).

$$\text{Relación de dilución} = \frac{\text{Volumen dilución}}{\text{Volumen desplazado}}$$

Solo se tomaron en cuenta el CO₂ y el CH₄, el oxígeno se pierde con el del aire de la mezcla de desplazamiento.

Tabla 3.7 Determinación de las relaciones de diluciones por reactor

| Reactor | Volumen desplazado Muestra @ 25°C | Volumen Aire @ 25°C | Volumen dilución | Relación de dilución |
|--------------|-----------------------------------|---------------------|------------------|----------------------|
| E2 Reactor 1 | 359.43 | 874 | 1233.43 | 3.43 |
| E2 Reactor 2 | 356.37 | 874 | 1230.37 | 3.45 |
| E2 Reactor 3 | 353.29 | 874 | 1227.29 | 3.47 |
| E2 Reactor 4 | 348.17 | 874 | 1222.17 | 3.51 |
| E3 UI | 39.05 | 205.87 | 244.92 | 6.27 |
| E3 UF | 36.03 | 205.87 | 241.90 | 6.71 |

E1=experimento 1, E2=Experimento 2, E3=Experimento 3, UI=Ultrasonido Inicial, UF=Ultrasonido Final

El cálculo de volúmenes de CH₄ y CO₂ generados por los reactores y las concentraciones de estos se calcularon aplicando como factor de ajuste o corrección la relación de dilución los resultados se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Cálculo de los volúmenes de gases generados y disueltos y concentraciones

| Reactor | Volumen @25°C (ml) | Concentraciones del cromatógrafo | | | Relación de dilución | Concentraciones Reales | | | Volúmenes de gases generados y disueltos | | |
|--------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| | | CO ₂ % v/v | CH ₄ % v/v | H ₂ % v/v | | CO ₂ % v/v | CH ₄ % v/v | H ₂ % v/v | CO ₂ Volumen (ml) | CH ₄ Volumen (ml) | H ₂ Volumen (ml) |
| E2 Reactor 1 | 359.43 | 3.86 | 11.92 | 0.00 | 3.43 | 13.25 | 40.91 | 0.00 | 47.61 | 147.02 | 0.00 |
| E2 Reactor 2 | 356.37 | 2.57 | 6.77 | 0.00 | 3.45 | 8.87 | 23.37 | 0.00 | 31.62 | 83.30 | 0.00 |
| E2 Reactor 3 | 353.29 | 1.69 | 5.24 | 0.03 | 3.47 | 5.87 | 18.20 | 0.12 | 20.74 | 64.31 | 0.12 |
| E2 Reactor 4 | 348.17 | 1.20 | 2.57 | 0.02 | 3.51 | 4.21 | 9.02 | 0.06 | 14.67 | 31.41 | 0.06 |
| E3 UI | 39.05 | 1.20 | 1.80 | 0.00 | 6.27 | 7.53 | 11.29 | 0.00 | 2.94* | 4.41* | 0.00* |
| E3 UF | 36.03 | 1.69 | 3.28 | 0.00 | 6.71 | 11.35 | 22.02 | 0.00 | 4.09* | 7.93* | 0.00* |

E1=experimento 1, E2=Experimento 2, E3=Experimento 3, UI=Ultrasonido Inicial, UF=Ultrasonido Final, *=volumen disuelto

Analizando los resultados de la tabla anterior se concluye que la generación del volumen de gas durante el tiempo es muy semejante en los reactores, pero las concentraciones de gases si es variada, esto es debido a la complejidad de la degradación de la materia orgánica, ya que depende de las colonias de bacterias, el tipo de ellas en cada fracción de muestra, los nutrientes, la temperatura, etc.

En cuanto al proyecto el sistema de separación de gases, aunque es suficiente para el ajuste por dilución, se cambiaran los porcentajes de muestra y recamara de gases de 200 mL de carga a 350 mL y el volumen de la recamara de gases y sistema de circulación será reducido a 150 mL, el tiempo de separación de gases por ultrasonido puede aumentar un poco, el volumen del sensor de gases es adecuado 2.23 mL, las mangueras serán recortadas para disminuir volumen, entre más baja sea la relación de dilución es mejor, el ideal es 1.

Los valores de Span se ajustan a los resultados de concentraciones máximas sin ajuste, para el CH₄ max = 15.4 se redondea a 20% y para el CO₂ max = 4.21 se redondea a 10%.

Para el oxígeno 20%, queda por determinar el NH₃, se está buscando la manera de determinarlo indirectamente ya que no se tiene la columna de cromatógrafo.

3.5 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA SONDA (MUESTREADOR)

Con la información del capítulo 3.4 se diseñó y fabrico la sonda, en la Figura 3.10 se muestra el diseño de la sonda. La longitud de la sonda es de 50 cm, el diámetro interno del cuerpo es de 1" (4), el vástago (3) tiene una longitud de 50 cm y un diámetro de 1/4", con un extremo roscado estándar; el pistón (2) es tiene un diámetro de 1" y una longitud de 5 cm, tiene doble ranura para la inserción de los sellos de hule (1), para evitar el paso del sedimento a través de él; la tapa (5) de 1 1/2" de diámetro exterior, 1 1/8" de diámetro interior, va soldada al cilindro de la sonda, por la parte superior esta roscada para la inserción de los tubos de extensión, hasta 6 de 1 metro de longitud.

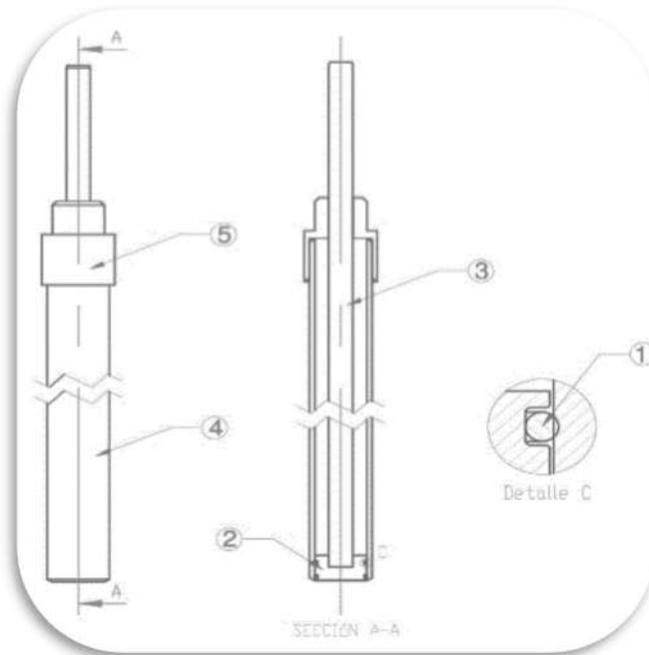


Figura 3.10 Diseño de la sonda (muestreador)

En la Figura 3.11 se detalla la sonda (muestreador) fabricada con acero inoxidable 305; en el inciso a, se muestra la sonda terminada, en el inciso b, se ve a detalle el pistón, con sus sellos tipo "O" ring y la unión roscada con el vástago y en el inciso c, se ve a detalle la unión de la tapa con el cilindro y la rosca de la tapa para la unión con los tubos de extensión de acero inoxidable 305.

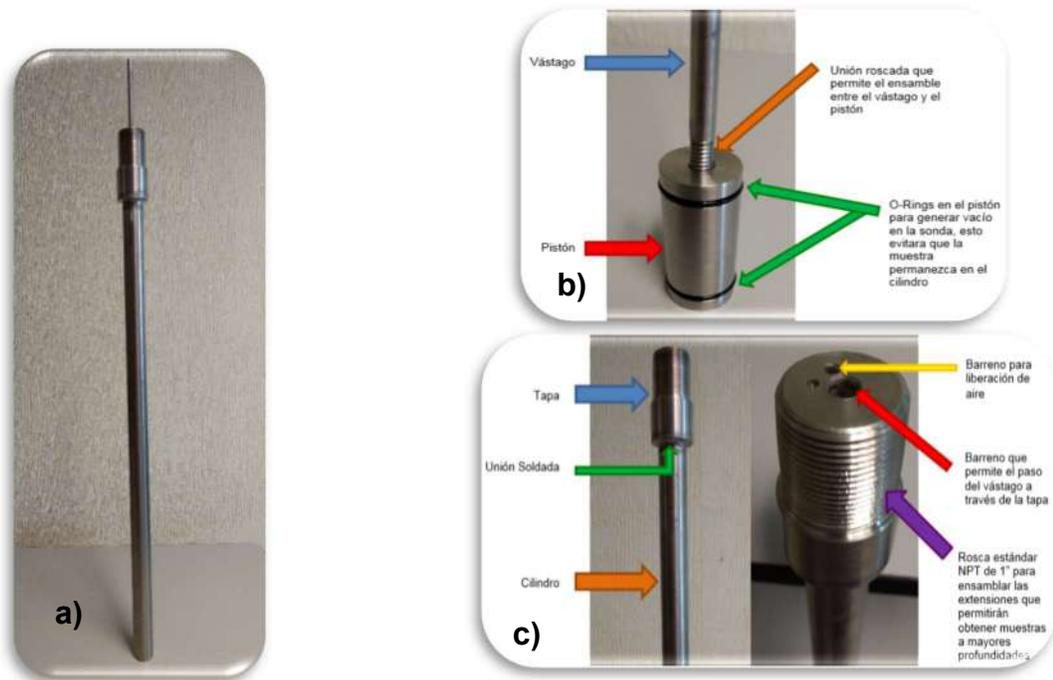


Figura 3.11 Detalle la fabricación de la sonda (muestreador)

3.5.1 Cálculo de volumen de muestra

Para el cálculo del volumen de la muestra se tiene que medir la longitud del vástago con una cinta de medir como se muestra en la figura 3.12, se aplica la fórmula de cálculo de volumen de un cilindro, $V = \pi r^2 * h$.

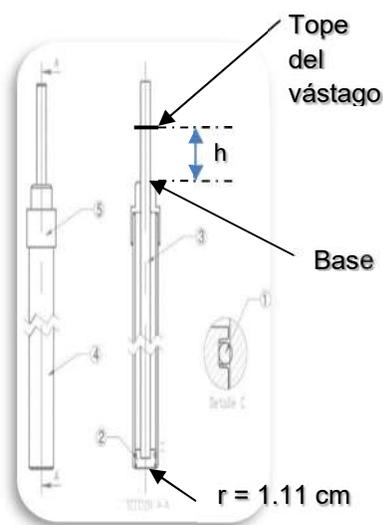


Figura 3.12 Cálculo de volumen de la muestra

Ejemplo: Si se extrae una muestra que tenga una altura entre el tope del vástago y la base roscada de 5 cm.

$$V = \pi r^2 * h = \pi * (1.11125\text{cm})^2 * 5\text{cm}$$

$$V = 19.39 \text{ cm}^3$$

$$\text{si } 1\text{mL} = 1\text{cm}^3$$

entonces el volumen en mL es 19.39 mL

Se pueden tener muestras desde 0 mL a 194 mL.

La sonda o muestreador puede extraer sedimentos tipo limosos y arcillosos hasta una profundidad de 50 cm, los sellos retienen la muestra por vacío, y no permiten el escape de los gases de la muestra.

3.6 DISEÑO Y DESARROLLO DE MULTI SENSOR DE GASES CH₄, CO₂ Y NH₃

Los sensores NDIR son los que tienen mejor respuesta para medir gases analíticamente y en concentraciones de 0 a 100% V/V (referencias). Aunque hay en el mercado sensores múltiples en uno solo, no hay específicamente para CH₄, CO₂ y NH₃. Por lo que se decidió diseñar y fabricar uno. Se basó en las longitudes de onda de cada gas como se muestra en la figura 3.13.

En la Figura 3.13 se hace la comparación entre los espectros de cada gas, con el fin de observar interferencias entre ellos, es decir si hay bandas de absorción parecidas o cercanas entre los gases. En la línea gris que se encuentra en 7442.97 nm corresponde a la banda de absorción más significativa del H₂S, se puede observar a lo largo de ella que hay interferencia entre el H₂S y el CH₄ a este valor de longitud de onda. En las demás líneas en las bandas de absorción seleccionadas para el resto de los gases azul NH₃ en 10.36nm, rojo CO₂ en 4.26nm y verde CH₄ en 3.32nm. Se puede apreciar claramente que no hay interferencias entre ellos.

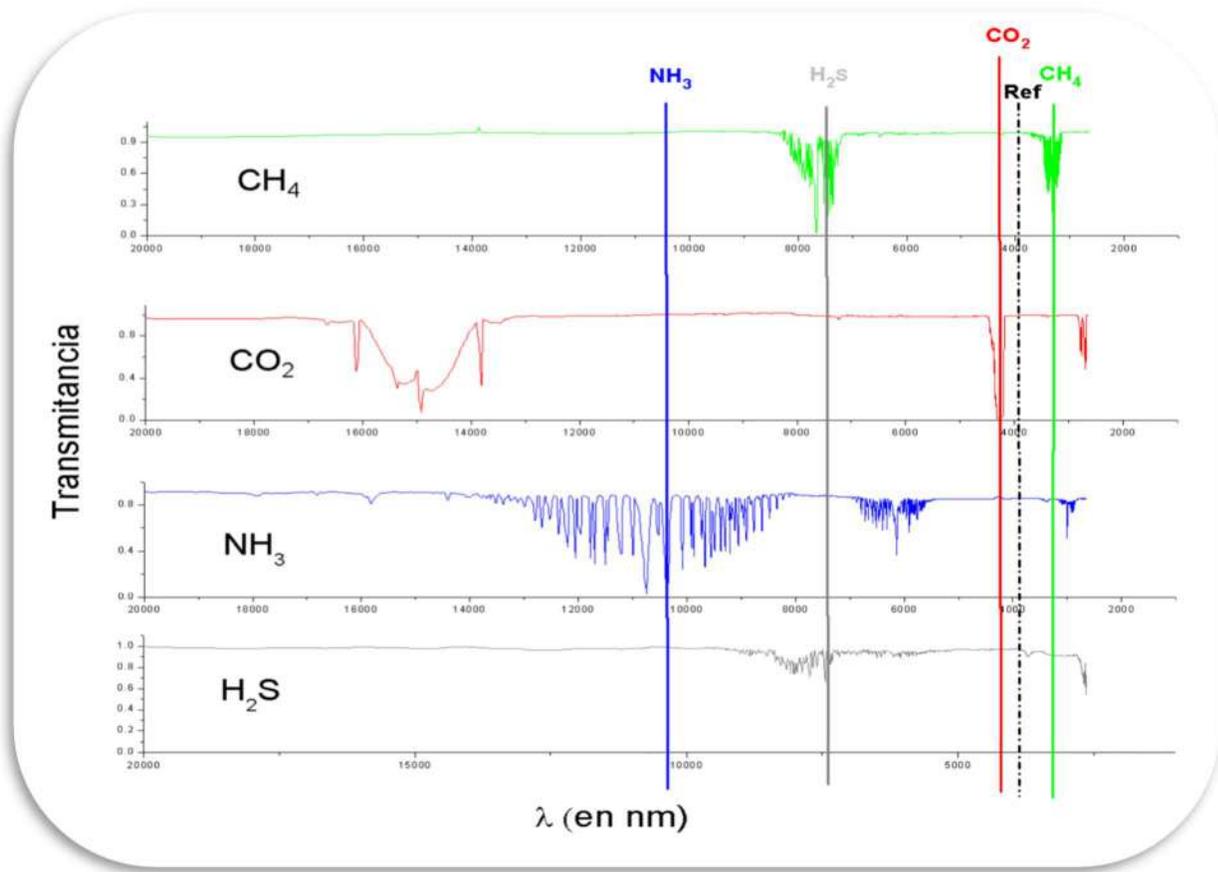


Figura 3.13 Comparación de los espectros infrarrojos de los gases

3.6.1 Determinación de anchos de banda para la selección de filtros

Una vez establecidas las longitudes de onda centrales de cada banda de absorción de los gases se procedió a determinar los anchos de banda para cada una de ellas. El ancho de banda es importante para la selección de los filtros infrarrojos ya que permitirán pasar solo la radiación correspondiente a cada banda de absorción e impidiendo el paso de la radiación que se encuentre fuera del rango establecido, sirviendo como selectores de radiación infrarroja en las mediciones.

Se establecieron los anchos de banda de las longitudes de onda centrales seleccionadas (CWL) para cada gas basándose tanto en las bandas de absorción de cada gas y en los

filtros de IR comerciales marca Electro Optical Components, Inc. (EOC) como se muestra en la Tabla 3.9.

Para el diseño del sensor, se incluye un filtro infrarrojo de referencia con el propósito de eliminar la intensidad de la luz externa y factores ambientales externos (Tan *et al.*, 2013).

Tabla 3.9 Parámetros específicos de los filtros infrarrojos para la detección de gases

| Gas | | CWL/ μm | BW/nm |
|-----------------------|-----------|--------------------|------------|
| Referencia | | 3.9 | 90 |
| CO₂ | Real | 4.26 | 275.9 |
| | Comercial | 4.26 | 120 |
| CH₄ | Real | 3.32 | 20.18 |
| | Comercial | 3.31 | 90 |
| NH₃ | Real | 10.36 | 169.89 |
| | Comercial | 10.4 | 120 |

3.6.2 Diseño del Sensor

Con la información anterior se procedió a la compra de los detectores de infrarrojo y los filtros montados en un solo encapsulado como se muestra en la Figura 3.14.

Este trabajo es especializado y único para este proyecto a través del laboratorio en Alemania de Micro-Hybrid.



Figura 3.14 Detectores y filtros en el mismo encapsulado (Micro-Hybrid, 2017)

En la figura 3.15 se muestra el Emisor de IR del mismo laboratorio Micro-Hybrid, es del tipo LED modelo JSIR350-5-BL-R-D3.6-0-0, que en comparación de las fuentes tradicionales de IR por lámpara incandescentes a tungsteno que son más económicas pero menos duraderas, la vida de una lámpara de tungsteno es de no más de 4 años y su costo oscila ya con el reflector en los 90 dólares americanos (ILT,2017) y el de tipo LED tiene una vida mayor a 5 años y un costo de 105 dólares americanos (EOC, 2017), es mucho más eficiente y con mayor potencia de radiación IR.



Figura 3.15. Fuente de IR (Micro-Hybrid, 2017)

El cuerpo del sensor se diseñó en base a la ley de Lambert-Beer, y las dimensiones del multi detector y de la fuente de IR, el cuerpo será de aluminio torneado pintado en su interior de negro mate para evitar el reflejo del haz de luz infrarroja en las paredes internas, los detalles de las dimensiones se muestran en la Figura 3.16.

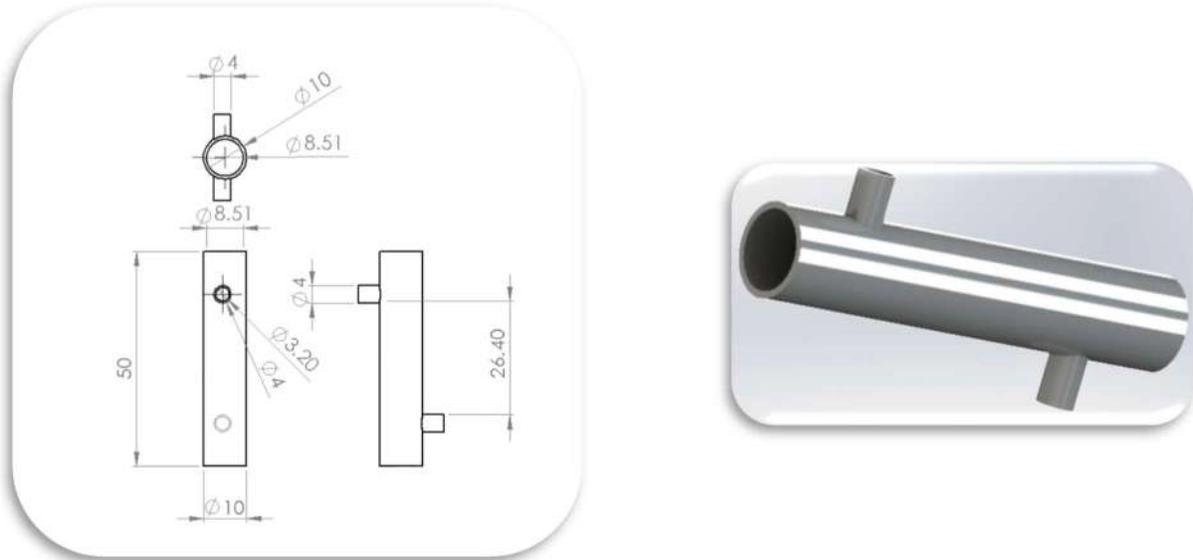


Figura 3.16 Dimensiones del cuerpo del Sensor (en mm), de lado izquierdo dimensiones y del lado derecho detalles del acabado

El ensamble final es el que se muestra en la Figura 3.17, donde se incluyen a) el emisor de infrarrojo, b) la cámara de gases, c) los filtros pasa banda montados para cada gas y referencia, d) los detectores de IR montados en el mismo encapsulado y f) acondicionadores de señales para cada detector.

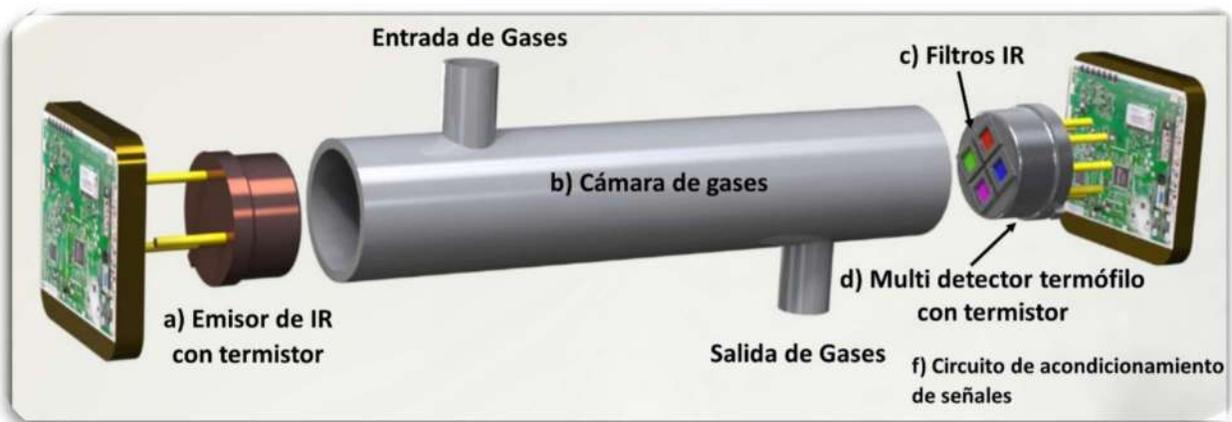


Figura 3.17 Diseño del Multi sensor NDIR para CH_4 , CO_2 y NH_3

Con la información anterior y al diseño del seminario anterior, se procedió a la fabricación del sensor de gases para CH_4 , CO_2 y NH_3 .

Se adquirió maquinaria y herramienta especial para la fabricación del sensor y para otros componentes del sistema completo, un mini torno de 7" x 10" (Figura 3.8 a), taladro de banco (Figura 3.18 b), juego de tarrajas y machuelos (Figura 3.18 c), esmeril (Figura 3.18 c)



Figura 3.18 Equipo para fabricar sensor y otros accesorios del sistema completo

En el proceso de fabricación se seleccionó el material Naylamid color negro, que presenta baja reflexión y buena absorción de luz infrarroja, además de presentar buena resistencia mecánica al desgaste y soporta elevadas temperaturas de operación (Levinson, 2017).

Se maquinó la carcasa del sensor a las dimensiones establecidas y comprobadas (Figura 3.19 a), en el proceso mejor el diseño de cilíndrico a un diseño en forma de prima, que permito un fácil maquinado y se logró una mejor superficie para al montaje (Figura 3.19 b), respetando el volumen interno.

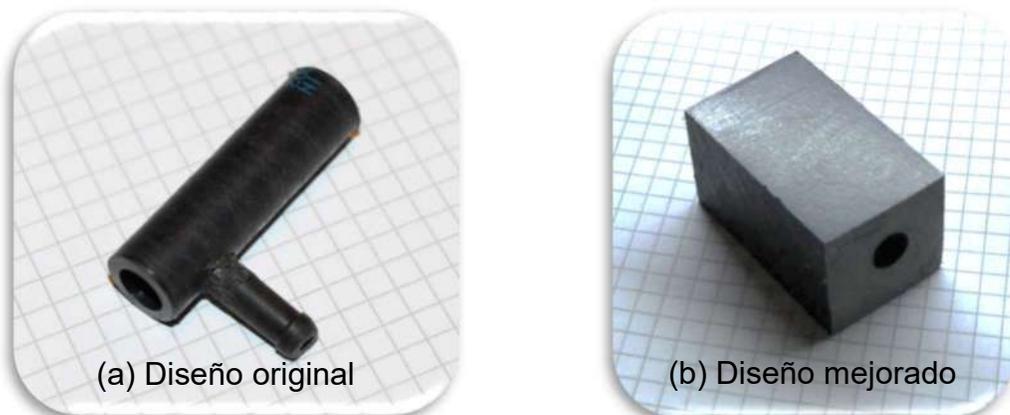


Figura 3.19 Maquinado de la carcasa del sensor de gases

Se montaron, los detectores termopilas, la fuente de IR, los sujetos tubos, cableado, supresores de picos de ferrita y conectores ver Figura 3.20.

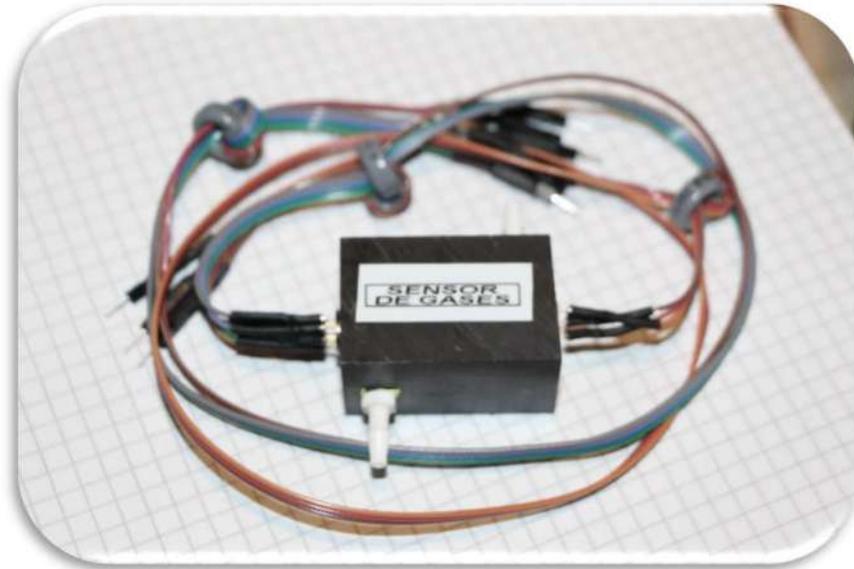


Figura 3.20 Sensor de gases CH₄, CO₂ y NH₃ ensamblado

El volumen total del sensor de gases es el siguiente:

En base a la fórmula de volumen del cilindro: $V = \pi * r^2 * h$, se calcularon los volúmenes de la carcasa y de los tubos sujetos mangueras, se hizo la sumatoria obteniendo el volumen total del sensor:

$$\begin{aligned} Vol. Sensor = & \text{Volumen de cilindro interno del sensor} + \text{volumen de sujeta manguera 1} \\ & + \text{volumen sujeta manguera 2} \end{aligned} \quad \text{Ec. 52}$$

$$Vol. Sensor = \pi * 5^2 * 26.4mm + 2(\pi * 1.1mm^2 * 20mm) = 2225.504 mm^3$$

Y en mL:

$$Vol. Sensor_{mL} = \frac{2225.504 mm^3 * 1mL}{1000 mm^3} = 2.23 mL \quad \text{Ec. 53}$$

El volumen de 2.23 mL del sensor y las mangueras con la longitud mínima permiten mediciones de volúmenes de 10 mL en adelante.

3.7 DISEÑO DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN DE GASES Y CIRCULACIÓN

En la industria de alimentación y envase de aceites, se usa el método de extracción de gases por medio de ultrasonido, que reduce considerablemente el tiempo de separación de horas a solo unos cuantos segundos, el tiempo depende de varios factores como el volumen de la muestra, la superficie de contacto con el transductor ultrasónico, la temperatura de la muestra y el vacío que se aplique al sistema de extracción (Hielscher, 2017), otros sistemas como el vortex, que consiste en generar un pequeño tornado dentro del recipiente que contiene a la muestra (Schlumberger, 2017). Aunque que es muy eficiente al igual que el ultrasónico es voluminoso y por ende más costoso que el ultrasónico, razones por la cual se seleccionó este último método para esta investigación.

Se diseño un sistema propio de extracción de gases, que está en proceso de patente (anexo 3), consiste en un recipiente de 500 mL, acondicionado en su base con un transductor piezoeléctrico de 30 Watts para generar las ondas de ultrasonido como se muestra en la Figura 3.21.

Se tomó la decisión de colocar el transductor dentro de la cámara de separación, por ser la mejor opción de contacto de la fuente de ultrasonido sobre la muestra, lo que disminuye considerablemente el tiempo de separación de gases. La principal ventaja de este diseño es eliminar la interferencia por turbidez del sedimento o de los líquidos, otra de las ventajas es que no solo podrá ser utilizado en sedimentos, funciona en cualquier semisólido, líquido o gases de la atmosfera.

En la tapa se colocaron dos válvulas una de entrada de presión y una de salida de vacío, que se interconecta al sistema de circulación y recirculación.

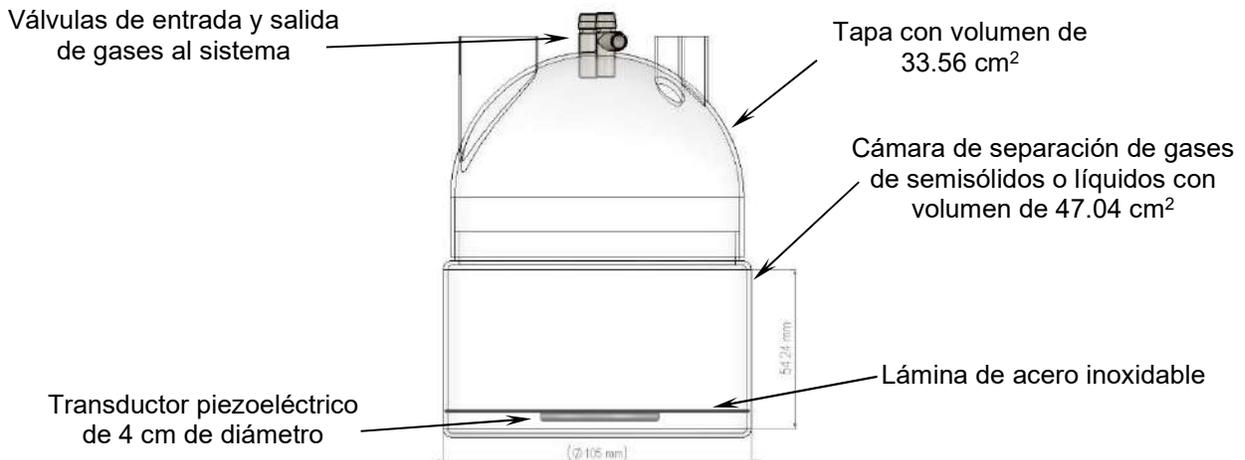


Figura 3.21. Diseño del separador de gases

En la Figura 3.22 puede observarse el sistema completo que se describe a continuación: Cuenta tres filtros de humedad de membrana de 200nm (1) dos colocados a la entrada del separador y uno en la salida del separador estos evitan interferencias, contaminación de humedad y partículas que por la presión de los vapores generados que pudieran fugarse al sistema de circulación/recirculación. Bomba de Vacío (3) de -400 mbar y flujo de 500 ml/min, esta se activa en modo de recirculación o cuando sea requerida. 3 electroválvulas de dos vías (4), la primera en conjunto con una "T" permite la salida de las mezclas de gases a la atmosfera, la segunda es la que activa la recirculación o circulación de la mezcla de gases. En modo de recirculación, los gases separados de la muestra están fluyendo en dentro del mismo sistema mientras se van sumando los que se van separando hasta llegar al equilibrio. En el modo de circulación que se activa con la última electroválvula opera de dos maneras, la primera es para usar gas de arrastre en este caso nitrógeno grado cromatográfico (5), para mantener una atmosfera inerte en la fase inicial de la medición en sedimentos y líquidos o bien si se requiere hacer mediciones de concentraciones de gases en la atmosfera se quita el tanque de nitrógeno, tomando la muestra directamente por esta toma. Sensores de presión (6) sirven para determinar las concentraciones de gases y el flujo en modo de circulación y en mediciones atmosféricas, como sería el caso de un tubo de venteo de un relleno sanitario. Sensores de temperatura (7) necesarios para el cálculo de la concentración de gases.

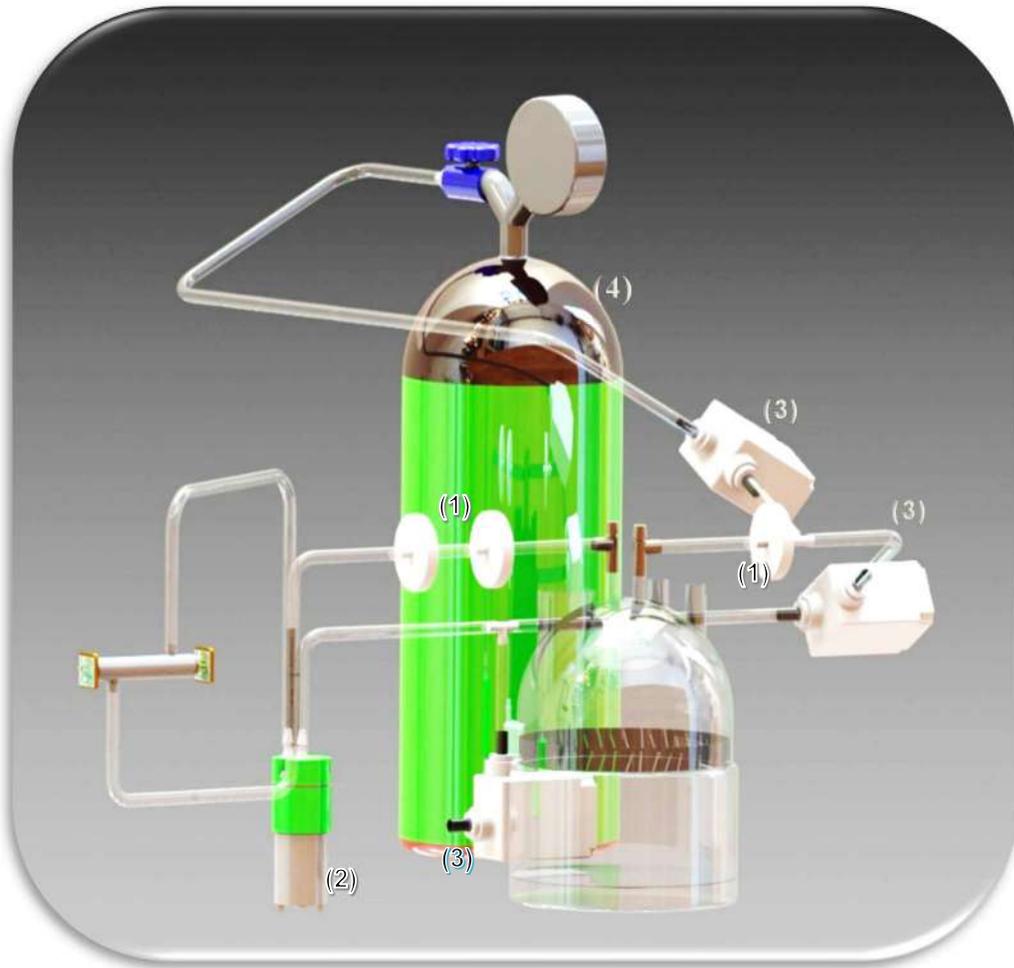


Figura 3.22. Diseño del sistema completo de extracción, circulación/recirculación, medición de concentración y volumen de gases

En la Figura 3.23 se muestra el diagrama a bloques del sistema de extracción de gases, el sistema de circulación-recirculación y medición de gases, se aprecia el flujo de los gases y los componentes que lo integran, es importante mencionar es que la cámara de gases 2 está separada de la uno por una razón muy importante, el sensor de sulfuro de hidrogeno por ser electroquímico es sensible a la vibraciones ultrasónicas, en la posición que se encuentra en el sistema, la cámara uno de gases sirve como atenuador y así llega la mínima cantidad de energía vibratoria a este sensor.

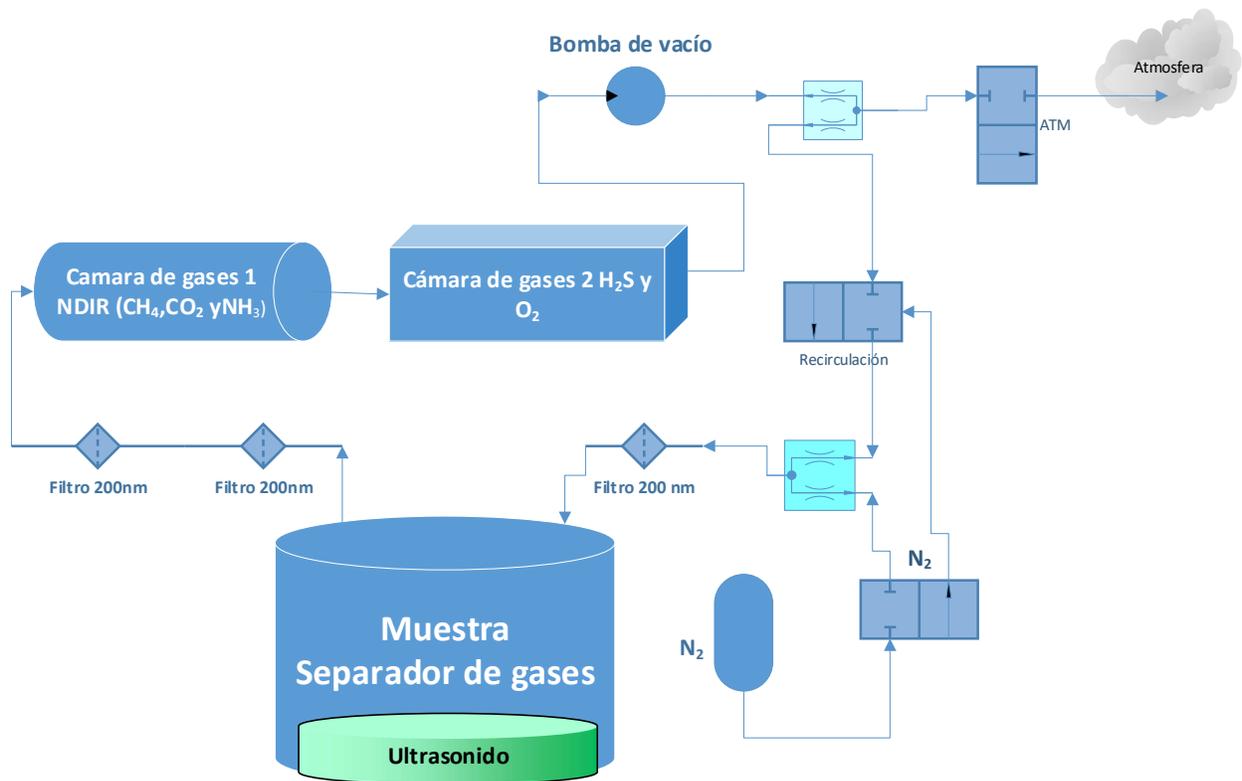


Figura 3.23 Diagrama a bloques del Sistema de extracción, circulación-recirculación y medición de gases

3.8 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES SE SENSORES DE TEMPERATURA, pH Y SENSORES DE GASES

A continuación, se describen los circuitos acondicionadores de señales para las diferentes etapas del dispositivo, sensor de temperatura, sensor de pH y sensores de gases.

3.8.1 Acondicionamiento de señal para sensor de temperatura

El acondicionamiento de señal será por medio de un divisor de voltaje, formado por el circuito serie que se muestra en la Figura 3.24.

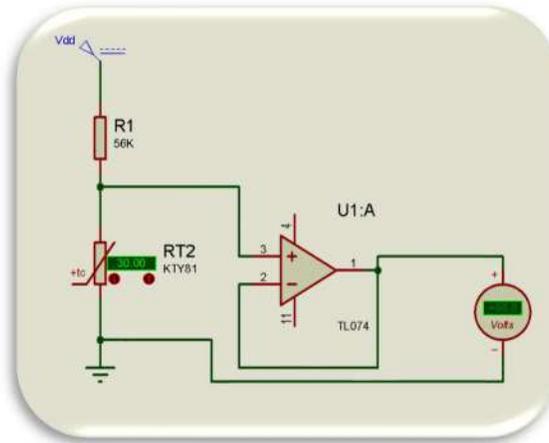


Figura 3.24 Divisor de voltaje para termistor

Donde $R1 = 56k\Omega$ de $\pm 1\%$ de error. Con la fórmula de división de voltaje se calcularon los voltajes mínimo y máximo, para determinar el acondicionamiento de señal:

$$V_{RT1} = \frac{V_{DD} * RT1}{RT1 + R1} \quad \text{Ec. 55}$$

Para el cálculo del voltaje mínimo, se utilizó la resistencia a 60°C que corresponde a $7.69k\Omega$:

$$V_{RT1 \min} = \frac{V_{DD} * RT1}{RT1 + R1} = \frac{3.3V * 7.69k\Omega}{7.69k\Omega + 56k\Omega} = 0.398V \quad \text{Ec. 56}$$

Para el cálculo del voltaje máximo, se utilizó la resistencia a 0°C que corresponde a $90.25k\Omega$:

$$V_{RT1 \min} = \frac{V_{DD} * RT1}{RT1 + R1} = \frac{3.3V * 90.25k\Omega}{90.25k\Omega + 56k\Omega} = 2.036V \quad \text{Ec. 57}$$

Con los valores de voltaje mínimo y máximo, se determinó para el acondicionamiento de señal, solo será necesario modificar el voltaje de referencia del ADC1115 a $\pm 2.048V$, con lo que se tendrá sensibilidad de temperatura:

$$Sensibilidad\ temperatura = \frac{60^{\circ}C}{32,768} = 0.00183\ ^{\circ}C/inc \quad Ec. 58$$

Error total de sistema de temperatura:

$$Error_{total} = Error_{Termistor} + Error_{Divisor} + Error_{Convertidor} \quad Ec. 59$$

$$Error_{total} = 0.662\% + 1\% + 0.1\% = \pm 1.762\% \quad Ec. 60$$

Se determinaron tres puntos de calibración (10, 30 y 50°C), uno por escala para determinar el factor de corrección, con lo que se aumentará la precisión y exactitud.

Como el sensor de temperatura ya viene integrado en el electrodo de pH, se determinó su respuesta mediante experimentación, se diseñó el circuito de acondicionamiento de señal, el algoritmo de programación para la medición en la etapa de procesamiento de datos, la calibración no es necesaria, porque los valores de resistencia del sensor son validados en la metodología siguiente, estos valores en teoría no cambian y en caso de haber variaciones en el tiempo será necesario reemplazar el electrodo.

Respuesta del termistor NTC

Al no contar con las tablas ni la respuesta del termistor incluido en el electrodo de pH de HACH, se determinaron 3 ecuaciones para el cálculo de este, para la adquisición y procesamiento de datos. El experimento consto de tres mediciones en el rango de 0°C a 60°C que el fabricante reporta como rango de operación en su hoja de especificaciones, con el fin de formular la ecuación o ecuaciones para el cálculo de la temperatura en las mediciones con el dispositivo (ver Tablas 3.10 y 3.11).

Los equipos y materiales se montaron como se muestra en la Figura 3.25.

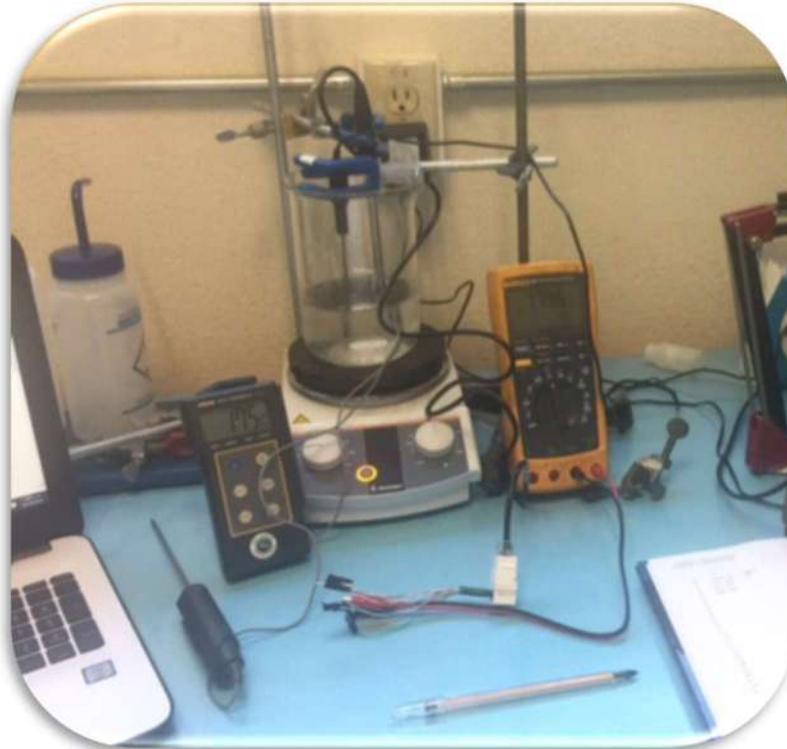


Figura 3.25 Método para determinar respuesta de temperatura vs. resistencia de termistor

Procedimiento

Colocar el agua con hielos en el vaso de precipitado, se introdujo una capsula magnética para agitar, se ajustó la temperatura del agitador de tal manera que se tuviera cambio de 1°C por minuto, la velocidad del agitador magnético a 100 revoluciones para mantener una temperatura homogénea en el agua del vaso de precipitado.

Se colocaron los sensores de temperatura en el líquido a distancias y profundidades simétricas, en cada cambio de grado a partir de 0°C a 60°C , se tomó registro de la temperatura y de la resistencia, el experimento se repitió y registro en tres ocasiones en la bitácora, ver tabla 3.10.

Tabla 3.10 Registro de 3 capturas para determinar valor promedio y error

| Temperatura | Captura 1 | Captura 2 | Captura 3 | Promedio | Desviación Estándar | Error % |
|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|---------------------|---------|
| 0 | 90.010 | 90.865 | 89.875 | 90.250 | 0.537 | 0.310 |
| 1 | 86.730 | 87.554 | 86.600 | 86.961 | 0.517 | 0.299 |
| 2 | 82.450 | 83.233 | 82.326 | 82.670 | 0.492 | 0.284 |
| 3 | 78.700 | 79.448 | 78.582 | 78.910 | 0.469 | 0.271 |
| 4 | 75.290 | 76.005 | 75.177 | 75.491 | 0.449 | 0.259 |
| 5 | 72.030 | 72.714 | 71.922 | 72.222 | 0.430 | 0.248 |
| 6 | 68.600 | 69.252 | 68.497 | 68.783 | 0.409 | 0.236 |
| 7 | 66.500 | 67.132 | 66.400 | 66.677 | 0.397 | 0.229 |
| 8 | 64.590 | 65.204 | 64.493 | 64.762 | 0.385 | 0.222 |
| 9 | 61.770 | 62.357 | 61.677 | 61.935 | 0.368 | 0.213 |
| 10 | 58.990 | 59.550 | 58.902 | 59.147 | 0.352 | 0.203 |
| 11 | 55.890 | 56.421 | 55.806 | 56.039 | 0.333 | 0.192 |
| 12 | 52.950 | 53.453 | 52.871 | 53.091 | 0.316 | 0.182 |
| 13 | 50.470 | 50.949 | 50.394 | 50.605 | 0.301 | 0.174 |
| 14 | 47.800 | 48.254 | 47.728 | 47.927 | 0.285 | 0.165 |
| 15 | 46.149 | 46.587 | 46.080 | 46.272 | 0.275 | 0.159 |
| 16 | 44.078 | 44.497 | 44.012 | 44.196 | 0.263 | 0.152 |
| 17 | 42.300 | 42.702 | 42.237 | 42.413 | 0.252 | 0.146 |
| 18 | 40.910 | 41.299 | 40.849 | 41.019 | 0.244 | 0.141 |
| 19 | 39.189 | 39.561 | 39.130 | 39.294 | 0.234 | 0.135 |
| 20 | 37.525 | 37.881 | 37.469 | 37.625 | 0.224 | 0.129 |
| 21 | 35.818 | 36.158 | 35.764 | 35.914 | 0.214 | 0.123 |
| 22 | 34.257 | 34.582 | 34.206 | 34.348 | 0.204 | 0.118 |
| 23 | 32.782 | 33.093 | 32.733 | 32.869 | 0.196 | 0.113 |
| 24 | 31.447 | 31.746 | 31.400 | 31.531 | 0.188 | 0.108 |
| 25 | 30.155 | 30.441 | 30.110 | 30.235 | 0.180 | 0.104 |
| 26 | 28.851 | 29.125 | 28.808 | 28.928 | 0.172 | 0.099 |
| 27 | 27.673 | 27.936 | 27.631 | 27.747 | 0.165 | 0.095 |
| 28 | 26.487 | 26.739 | 26.447 | 26.558 | 0.158 | 0.091 |
| 29 | 25.407 | 25.648 | 25.369 | 25.475 | 0.152 | 0.088 |

Tabla 3.11 Registro de 3 capturas para determinar valor promedio y error (continuación)

| Temperatura °C | Captura 1 Resistencia en kΩ | Captura 2 Resistencia en kΩ | Captura 3 Resistencia en kΩ | Promedio Resistencia en kΩ | Desviación Estándar | Error % |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|---------|
| 30 | 24.381 | 24.613 | 24.344 | 24.446 | 0.145 | 0.084 |
| 31 | 23.259 | 23.480 | 23.224 | 23.321 | 0.139 | 0.080 |
| 32 | 22.385 | 22.598 | 22.351 | 22.445 | 0.134 | 0.077 |
| 33 | 21.471 | 21.675 | 21.439 | 21.528 | 0.128 | 0.074 |
| 34 | 20.607 | 20.803 | 20.576 | 20.662 | 0.123 | 0.071 |
| 35 | 19.778 | 19.966 | 19.748 | 19.831 | 0.118 | 0.068 |
| 36 | 18.917 | 19.097 | 18.889 | 18.967 | 0.113 | 0.065 |
| 37 | 18.282 | 18.456 | 18.255 | 18.331 | 0.109 | 0.063 |
| 38 | 17.750 | 17.919 | 17.723 | 17.797 | 0.106 | 0.061 |
| 39 | 17.188 | 17.351 | 17.162 | 17.234 | 0.103 | 0.059 |
| 40 | 16.433 | 16.589 | 16.408 | 16.477 | 0.098 | 0.057 |
| 41 | 15.696 | 15.845 | 15.672 | 15.738 | 0.094 | 0.054 |
| 42 | 15.063 | 15.206 | 15.040 | 15.103 | 0.090 | 0.052 |
| 43 | 14.477 | 14.615 | 14.455 | 14.516 | 0.086 | 0.050 |
| 44 | 13.900 | 14.032 | 13.879 | 13.937 | 0.083 | 0.048 |
| 45 | 13.370 | 13.497 | 13.350 | 13.406 | 0.080 | 0.046 |
| 46 | 12.963 | 13.086 | 12.944 | 12.998 | 0.077 | 0.045 |
| 47 | 12.493 | 12.612 | 12.474 | 12.526 | 0.075 | 0.043 |
| 48 | 12.000 | 12.114 | 11.982 | 12.032 | 0.072 | 0.041 |
| 49 | 11.550 | 11.660 | 11.533 | 11.581 | 0.069 | 0.040 |
| 50 | 11.116 | 11.222 | 11.099 | 11.146 | 0.066 | 0.038 |
| 51 | 10.727 | 10.829 | 10.711 | 10.756 | 0.064 | 0.037 |
| 52 | 10.392 | 10.491 | 10.376 | 10.420 | 0.062 | 0.036 |
| 53 | 9.927 | 10.021 | 9.912 | 9.953 | 0.059 | 0.034 |
| 54 | 9.541 | 9.632 | 9.527 | 9.566 | 0.057 | 0.033 |
| 55 | 9.249 | 9.337 | 9.235 | 9.274 | 0.055 | 0.032 |
| 56 | 8.915 | 9.000 | 8.902 | 8.939 | 0.053 | 0.031 |
| 57 | 8.575 | 8.656 | 8.562 | 8.598 | 0.051 | 0.030 |
| 58 | 8.262 | 8.340 | 8.250 | 8.284 | 0.049 | 0.028 |
| 59 | 7.963 | 8.039 | 7.951 | 7.984 | 0.048 | 0.027 |
| 60 | 7.670 | 7.743 | 7.659 | 7.690 | 0.046 | 0.026 |
| | | | | Error promedio | 0.112 | |

De la tabla anterior se obtuvo la Gráfica de la Figura 3.26, del promedio de resistencia de las tres mediciones, con la que se determina una ecuación general y en su caso ecuaciones parciales, las que dependen del mínimo error esperado.

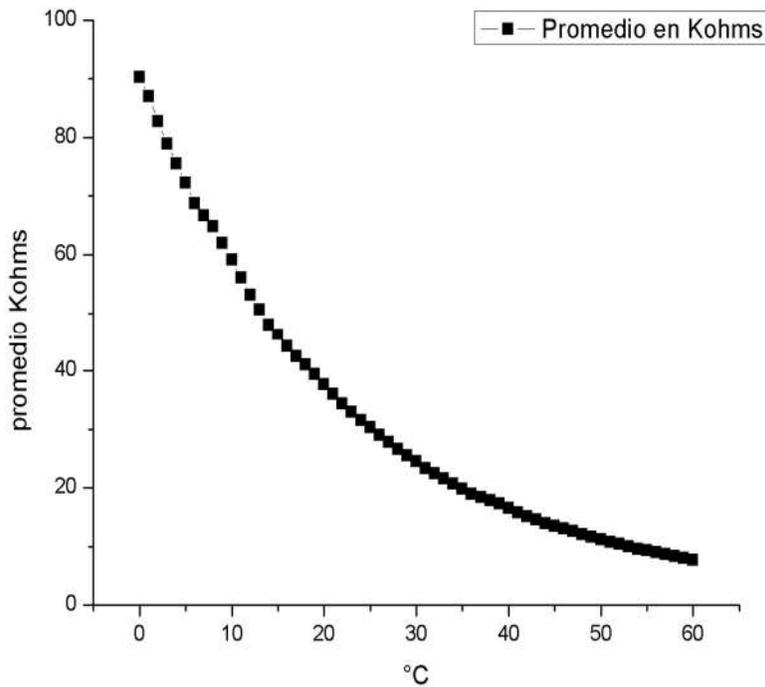


Figura 3.26 Gráfica de curva promedio de temperatura vs resistencia

Por medio del método de regresión exponencial utilizando la herramienta de Microsoft Excel se obtuvo la fórmula general para determinar la temperatura según la resistencia.

$$Y = -9x10^8X^5 + 2x10^5X^4 - 0.0027X^3 + 0.1537X^2 - 4.868X + 88.906 \quad \text{Ec. 61}$$

Con un coeficiente de correlación de Pearson (determinación):

$$R^2 = 0.9998 = 99.98\% \quad \text{Ec. 62}$$

Al hacer una corrida con la ecuación 3.21, no se obtuvieron los resultados esperados, un error por encima del 10%, por lo que se decidió realizar tres ecuaciones parciales en tres escalas, de 0 - 19°C, 20 – 39°C y de 40 – 60°C con el fin de tener más precisión y exactitud, teniendo los siguientes resultados:

En el rango de 0-19°C se obtuvo la ecuación por el método de regresión logarítmica con Microsoft Excel (Ver figura 3.27):

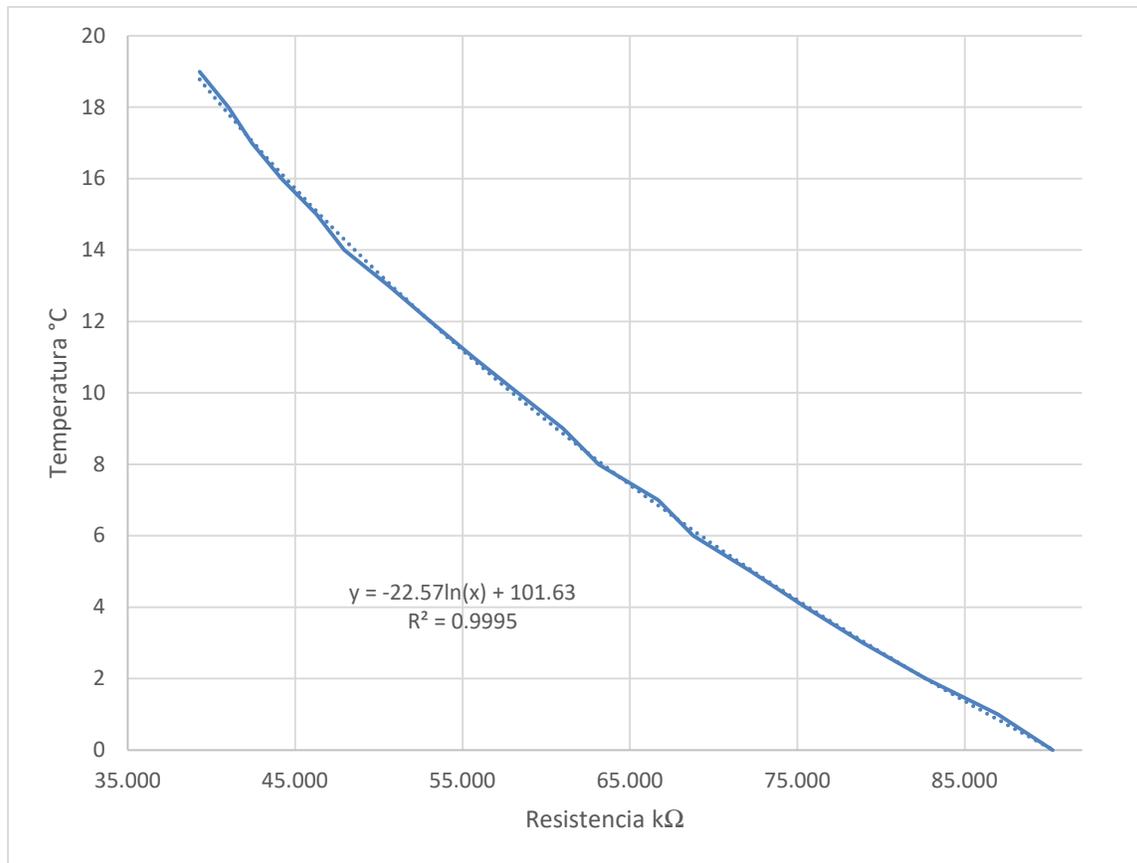


Figura 3.27 Gráfica y cálculo de la fórmula de 0-19°C

La ecuación resultante es:

$$y = -22.57 * \ln(x) + 101.63$$

Ec. 63

$$R^2 = 99.95\%$$

Como se observa en la gráfica la respuesta es aceptable, se probó la ecuación teniendo un error total de 1.04% (Ver tabla 3.12).

Tabla 3.12 Calculo del error por grado centígrado y error total por rango de 0 a 19°C

| Temperatura °C | Resistencia KΩ | Temperatura Calculada | Error % |
|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------|
| 0 | 90.250 | 0.007 | 0.668 |
| 1 | 86.961 | 0.996 | 0.435 |
| 2 | 82.670 | 1.987 | 0.664 |
| 3 | 78.910 | 3.037 | 1.244 |
| 4 | 75.491 | 4.037 | 0.927 |
| 5 | 72.222 | 5.036 | 0.723 |
| 6 | 68.783 | 6.137 | 2.289 |
| 7 | 66.677 | 6.839 | 2.299 |
| 8 | 63.124 | 8.075 | 0.938 |
| 9 | 61.000 | 8.848 | 1.694 |
| 10 | 58.300 | 9.869 | 1.306 |
| 11 | 55.630 | 10.927 | 0.660 |
| 12 | 53.091 | 11.982 | 0.152 |
| 13 | 50.605 | 13.064 | 0.495 |
| 14 | 47.927 | 14.291 | 2.079 |
| 15 | 46.272 | 15.084 | 0.563 |
| 16 | 44.196 | 16.121 | 0.755 |
| 17 | 42.413 | 17.050 | 0.294 |
| 18 | 41.019 | 17.804 | 1.088 |
| 19 | 39.294 | 18.774 | 1.188 |
| Error promedio | | | 1.042 |

En el rango de 20-39°C se obtuvo la ecuación por el método de regresión logarítmica con Microsoft Excel (Ver figura 3.28):

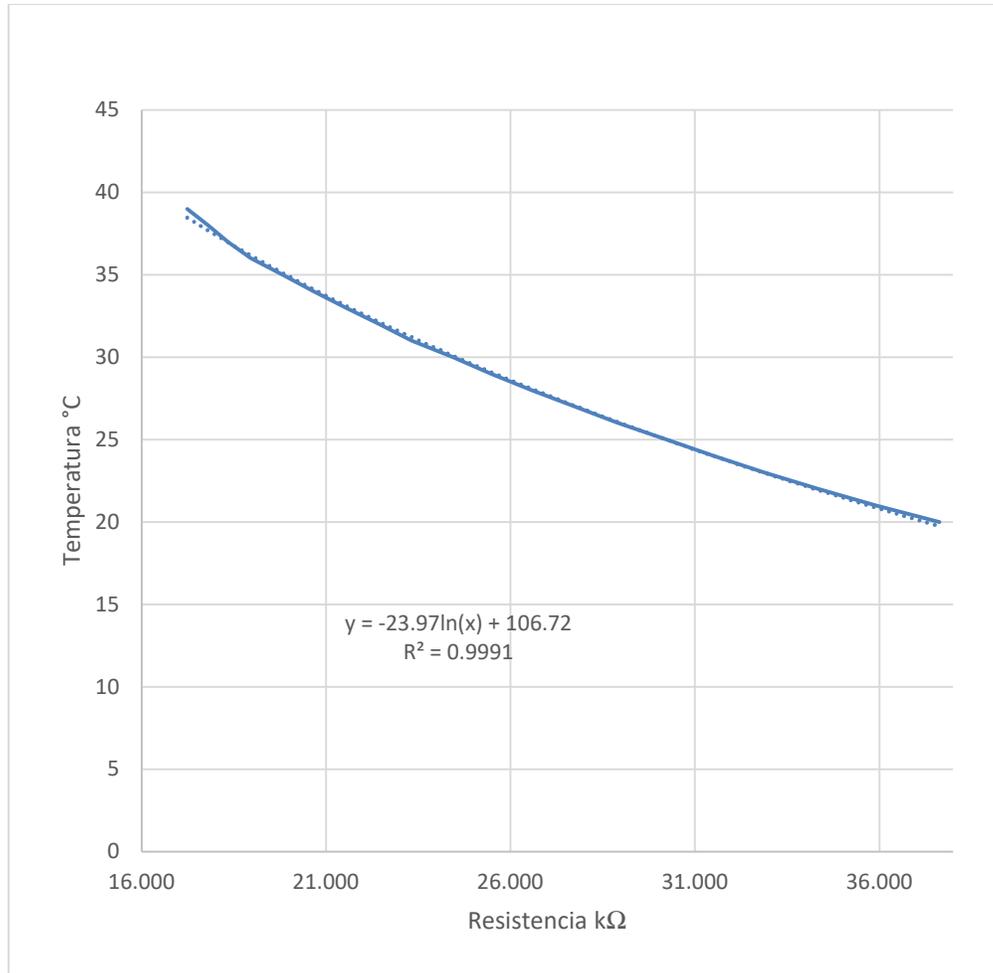


Figura 3.28 Gráfica y cálculo de la fórmula de 20-39°C

La ecuación resultante es:

$$y = -23.97 * \ln(x) + 106.72$$

Ec. 64

$$R^2 = 99.91\%$$

En este rango se ajusta mejor la curva resultante, se probó la ecuación teniendo un error total de 0.43 % (Ver tabla 3.13).

Tabla 3.13 Cálculo del error por grado centígrado y error total por rango de 19 a 39°C

| Temperatura °C | Resistencia kΩ | Temperatura Calculada | Error % |
|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------|
| 20 | 37.625 | 19.765 | 1.176 |
| 21 | 35.914 | 20.881 | 0.568 |
| 22 | 34.348 | 21.949 | 0.233 |
| 23 | 32.869 | 23.004 | 0.016 |
| 24 | 31.531 | 24.000 | 0.001 |
| 25 | 30.235 | 25.006 | 0.024 |
| 26 | 28.928 | 26.066 | 0.252 |
| 27 | 27.747 | 27.065 | 0.240 |
| 28 | 26.558 | 28.115 | 0.410 |
| 29 | 25.475 | 29.113 | 0.388 |
| 30 | 24.446 | 30.101 | 0.336 |
| 31 | 23.321 | 31.230 | 0.742 |
| 32 | 22.445 | 32.148 | 0.463 |
| 33 | 21.528 | 33.147 | 0.446 |
| 34 | 20.662 | 34.132 | 0.388 |
| 35 | 19.831 | 35.116 | 0.331 |
| 36 | 18.967 | 36.183 | 0.508 |
| 37 | 18.331 | 37.001 | 0.004 |
| 38 | 17.797 | 37.709 | 0.765 |
| 39 | 17.234 | 38.480 | 1.332 |
| | | Error Promedio | 0.431 |

En el rango de 20-39°C se obtuvo la ecuación por el método de regresión logarítmica con Microsoft Excel (Ver figura 3.29):

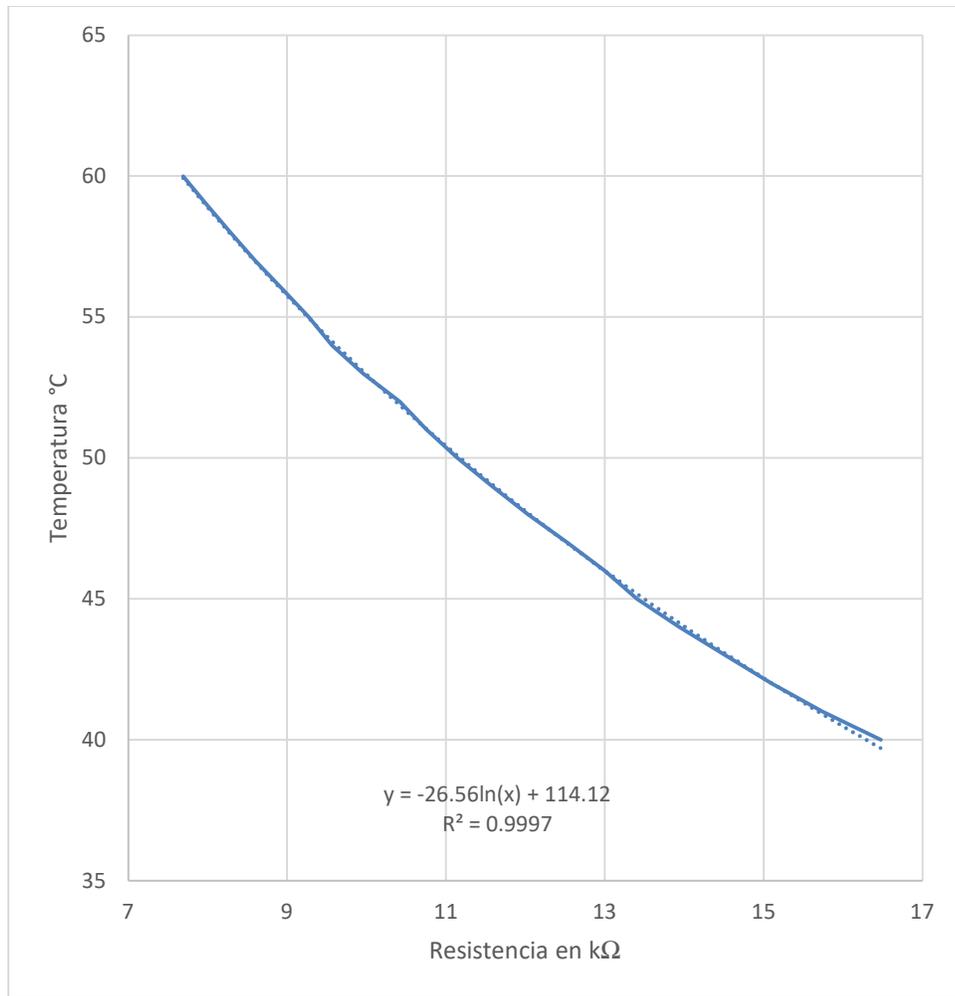


Figura 3.29 Gráfica y cálculo de la fórmula de 40-60°C

La ecuación resultante es:

$$y = -26.56 * \ln(x) + 114.12 \quad \text{Ec. 65}$$

$$R^2 = 99.97\%$$

La curva resultante es casi igual a la real, lo cual en este rango de temperaturas se tiene mayor exactitud, se probó la ecuación teniendo un error total de 0.17 % (Ver tabla 3.14).

Tabla 3.14 Cálculo del error por grado centígrado y error total por rango de 40 a 60°C

| Temperatura °C | Resistencia kΩ | Temperatura Calculada | Error % | |
|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------|-------|
| 40 | 16.47682 | 40 | 39.700 | 0.750 |
| 41 | 15.73786 | 41 | 40.919 | 0.198 |
| 42 | 15.10317 | 42 | 42.012 | 0.029 |
| 43 | 14.51561 | 43 | 43.066 | 0.154 |
| 44 | 13.93707 | 44 | 44.146 | 0.332 |
| 45 | 13.40565 | 45 | 45.179 | 0.397 |
| 46 | 12.99757 | 46 | 46.000 | 0.000 |
| 47 | 12.52631 | 47 | 46.981 | 0.041 |
| 48 | 12.032 | 48 | 48.050 | 0.104 |
| 49 | 11.5808 | 49 | 49.065 | 0.133 |
| 50 | 11.14564 | 50 | 50.083 | 0.165 |
| 51 | 10.75561 | 51 | 51.029 | 0.056 |
| 52 | 10.41971 | 52 | 51.871 | 0.247 |
| 53 | 9.95347 | 53 | 53.087 | 0.165 |
| 54 | 9.56644 | 54 | 54.141 | 0.260 |
| 55 | 9.27366 | 55 | 54.966 | 0.062 |
| 56 | 8.93877 | 56 | 55.943 | 0.102 |
| 57 | 8.59787 | 57 | 56.976 | 0.043 |
| 58 | 8.28403 | 58 | 57.963 | 0.063 |
| 59 | 7.98423 | 59 | 58.942 | 0.098 |
| 60 | 7.69045 | 60 | 59.938 | 0.103 |
| | Error | promedio | 0.167 | |

Con lo anterior se determina un error promedio de las tres ecuaciones de 0.55%, el error de termistor sería:

$$Error_{termistor} = Error\ de\ captura + error\ promedio\ de\ regresion$$

$$Error_{termistor} = 0.55\% + 0.112\% = \pm 0.662\% \quad \text{Ec. 66}$$

Una vez determinado el error más bajo, se procedió al acondicionamiento de señal y el algoritmo de programación.

Con la información anterior se procedió a elaborar el algoritmo de programación para calibración y operación de medición de temperatura en el dispositivo.

3.8.2 Acondicionamiento de señal para sensor de pH

El acondicionamiento de señal para el ISFET, se utilizó el circuito recomendado por el fabricante de circuitos ISFET Winsense Co., LTD (ver figura 3.30). El principio de operación es mantener la corriente I_{DS} constante y el voltaje V_D para que se mantenga el voltaje de salida linealmente dependiente del pH de la solución de prueba (Winsense, 2016).

El Voltaje Constante de salida del circuito U1:A (V_{DS}), es un amplificador operacional configurado como seguidor de señal, se obtiene del divisor de voltaje que se forma entre R3, R2 y R1:

$$V_{DS} = \frac{V_{D1} * R1}{R1 + R2 + R3} = \frac{1.2 V * 4.7k\Omega}{4.7k\Omega + 4.7k\Omega + 10k\Omega} = 0.29V \quad \text{Ec. 67}$$

La corriente constante I_{DS} se obtiene de los circuitos operacionales U1:B y U1:C, la corriente regulada esta entre los $25\mu A$ y $35\mu A$.

Todas las resistencias deben ser de precisión de 1% de error.

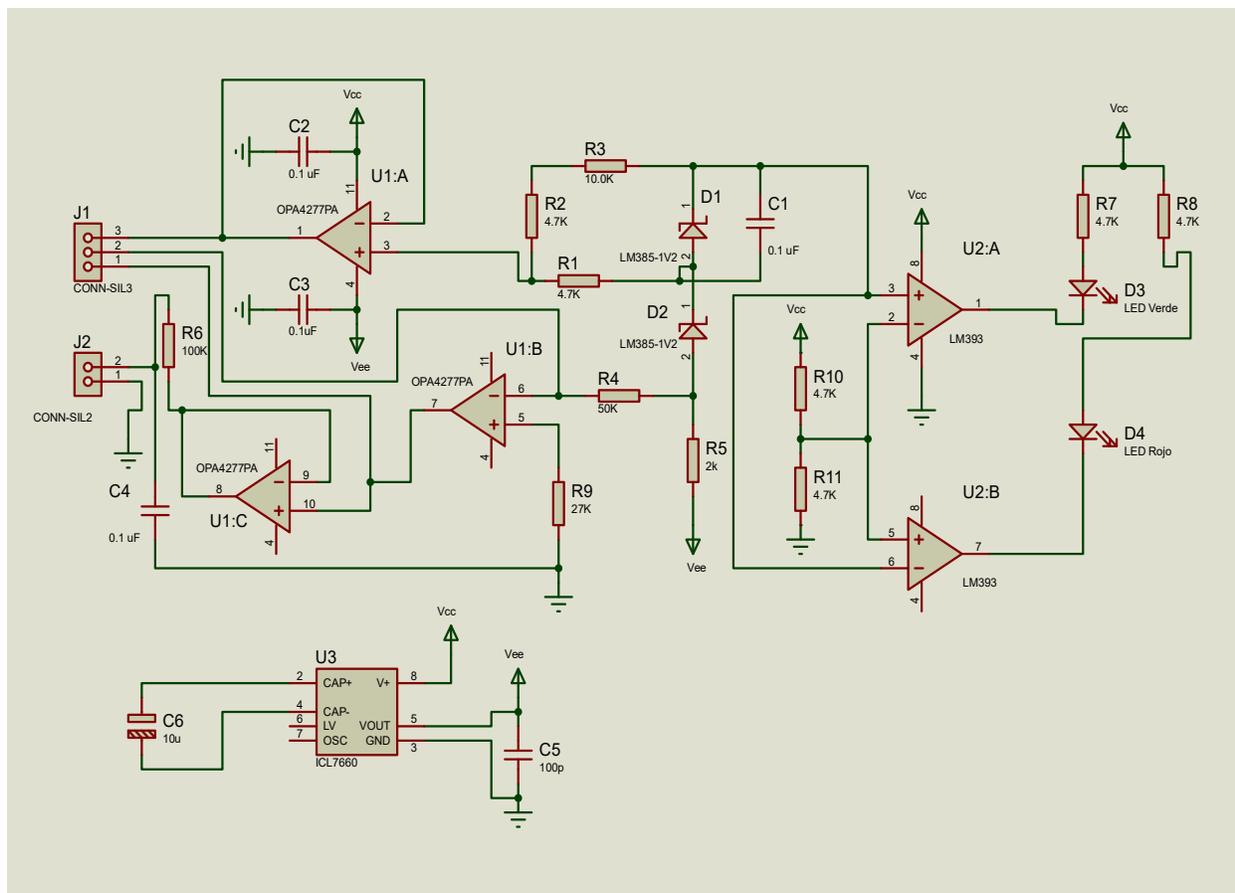


Figura 3.30 Circuito acondicionador de señal para sensor de pH

Respuesta del electrodo de pH

Se determinó la respuesta del sensor con el circuito acondicionador, que mantiene un voltaje constante de 300 mV a una corriente constante de 100 μ A.

Una vez montado el circuito con electrodo de pH se siguió la metodología de las normas antes mencionadas y recomendaciones de fabricante análisis de respuesta a temperatura ambiente 25°C y en todo el rango de operación de temperatura en este caso de 0 a 60 °C (Winsence, 2016):

Análisis a temperatura ambiente (25 °C):

Determinar la respuesta de salida del circuito acondicionador de señal del electrodo pH, a 25 °C, siguiendo los siguientes pasos:

Consiste en tres mediciones a temperatura de solución buffer a 25°C, medir los voltajes de salida del circuito acondicionador de señal con el multímetro y anotar los resultados en bitácora.

Verificar la temperatura ambiente: 23.3 °C

Verter 60 mL de Soluciones buffer en los vasos de precipitado 4, 7 y 10 pH.

Verificar la temperatura las soluciones, en caso de que estén por encima de los 25 °C, refrigerar durante el tiempo que sea necesario para bajar la temperatura por debajo de los 25 °C:

pH 4: 22.9 °C; pH 7: 22.8 °C; pH 10: 22.9 °C

Colocar los vasos de precipitado uno por uno, con el agitador magnético, colocar la parrilla a 25°C, agitar a 60 rpm, colocar el electrodo de pH y el de temperatura dentro de la solución buffer pH 4, sin tocar el fondo. Cuando la temperatura se estabilice en 25 °C, esperar 30 segundos, tomar la lectura del voltaje de salida y anotar en la bitácora. Quitar los electrodos, lavarlos con agua destilada y secarlos. Repetir el proceso con las otras dos soluciones buffer. Los resultados se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Respuesta del electrodo de pH a 25 °C

| pH | Volts |
|-----------|--------------|
| 4 | 0.82 |
| 7 | 0.98 |
| 10 | 1.13 |

Se graficaron los resultados para verificar el tipo de respuesta, lineal, exponencial, polinomial o logarítmica, utilizando la herramienta de Microsoft Excel. La cual resultó lineal con un coeficiente de correlación de Pearson que representa un alto grado de confianza como se muestra en la Figura 3.31.

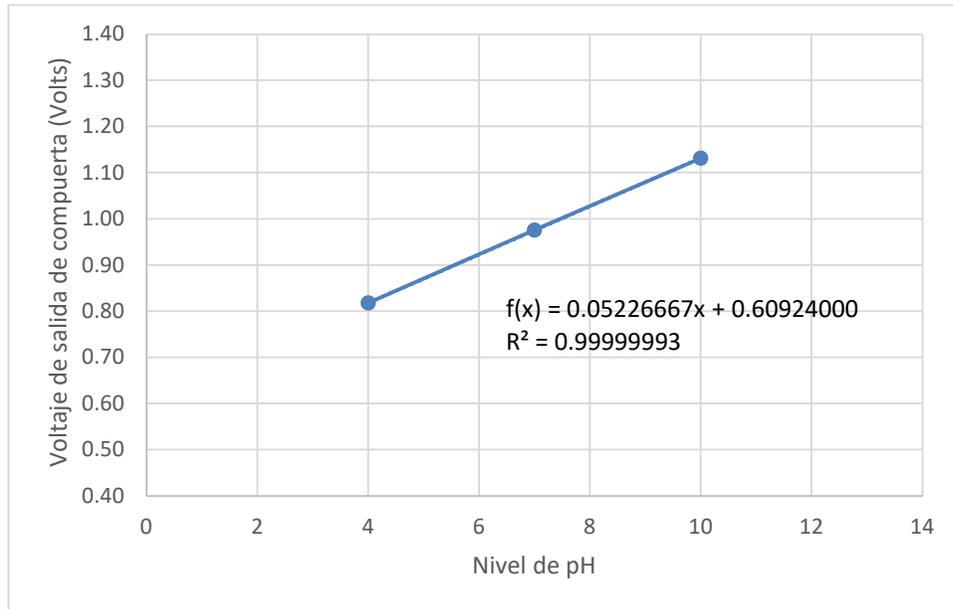


Figura 3.31 Respuesta lineal del electrodo de pH

Análisis en el rango de 0 a 60°C:

Colocar las soluciones buffers (pH 4, 7 y 10) en el refrigerador (congelador) hasta que lleguen al punto de congelación 0°C sin llegar a la fase sólida.

Colocar la solución buffer pH en la parrilla de agitación, agitar a 60 rpm, colocar el electrodo de pH y el termómetro sin tocar el fondo, tomar la lectura de voltaje en la bitácora cuanto se tenga la temperatura de 0°C, subir a 10°C, cuando se estabilice tomar lectura de salida de voltaje, repetir cada 10 °C hasta completar los 60 °C. Repetir el proceso para las soluciones buffer pH 7 y pH 10.

Vaciar los resultados como se inca en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Respuesta del electrodo de pH de 0 a 60°C

| | Temperatura en °C | | | | | | | |
|----|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| pH | 0 | 10 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 10 | 1.16 V | 1.15 V | 1.14 V | 1.13 V | 1.12 V | 1.11 V | 1.10 V | 1.09 V |
| 7 | 1.02 V | 1.00 V | 0.99 V | 0.98 V | 0.97 V | 0.95 V | 0.93 V | 0.91 V |
| 4 | 0.87 V | 0.85 V | 0.83 V | 0.82 V | 0.81 V | 0.79 V | 0.76 V | 0.74 V |

Se gráfica la tabla anterior y se hace el análisis de linealidad ver Figura 3.32, donde se observan las tres rectas correspondientes a cada solución buffer, como se aprecia que, aunque las tres son lineales y con alto grado de confiabilidad, no tienen la misma pendiente por lo cual hay que hacer ajustes para poder desarrollar el algoritmo de corrección por temperatura cuando se haga la adquisición de datos.

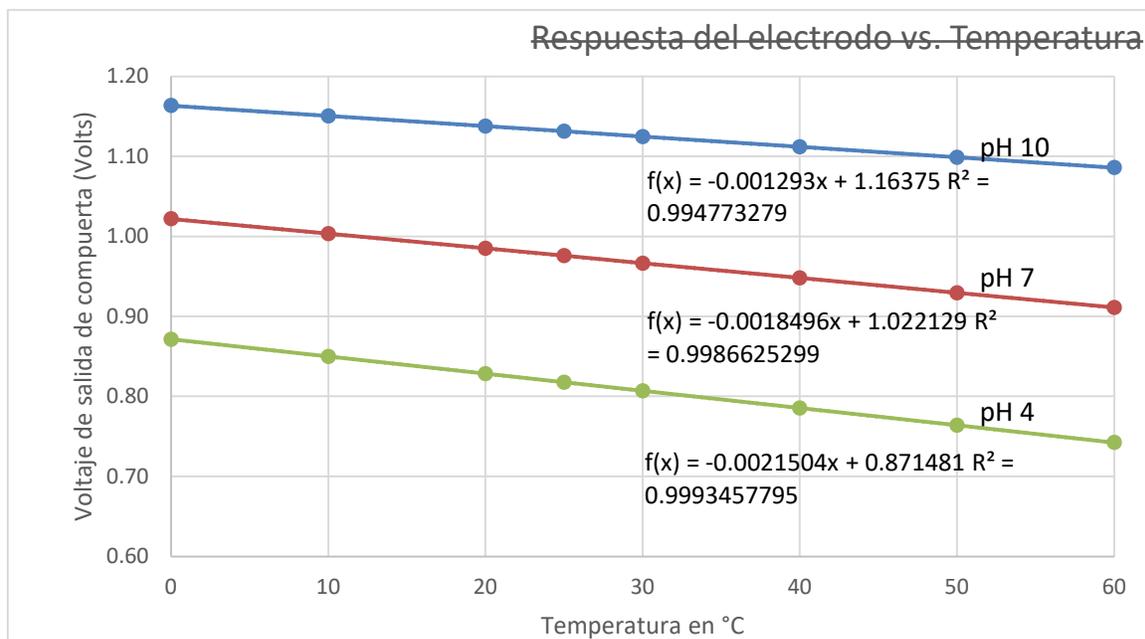


Figura 3.32 Respuesta en Voltaje del electrodo de pH de 0 a 60 °C

Para determinar el factor de corrección, se calcula la diferencia entre el máximo y el mínimo de voltaje entre 0 y 60°C, segundo se obtiene la desviación por cada grado centígrado de cada una de las rectas de los pH, ver tabla 3.17.

Tabla 3.17 Desviación por °C en cada ecuación

| pH | Diferencia ($V_{Max} - V_{Min}$) | Desviación por °C (Diferencia/61) |
|----|------------------------------------|-----------------------------------|
| 10 | 0.08 V | 0.001272 |
| 7 | 0.11 V | 0.001819 |
| 4 | 0.13 V | 0.002115 |

El factor de corrección se obtiene de dos ecuaciones de la recta una entre la desviación entre el pH 10 y pH 7 y otra de entre pH 7 y pH4, de donde obtenemos factores de corrección a lo largo de toda la escala de pH 0 a pH 14. El factor de corrección quedaría de la siguiente manera:

Para pH entre 7 y 10:

$$y = mp_{g107} (pH_{tmp} - 7) + 0.001819 \quad \text{Ec. 68}$$

Dónde: y = coeficiente de corrección por temperatura

mp_{g107} = es la pendiente de que se da entre la desviación pH 10 Y 7

pH_{tmp} = Lectura de pH sin corrección a una temperatura diferente a 25 °C

$$Fc = diftemp * y \quad \text{Ec. 69}$$

Dónde: Fc = Factor de corrección de temperatura

$diftemp$ = es la diferencia entre la temperatura actual y 20 °C

El error total en las ecuaciones a 25 °C es prácticamente cero como se aprecia en los coeficientes de correlación de Pearson (determinación) de la figura 3.12, el error incrementa cuando la temperatura se aleja de los 25 °C, será en la práctica cuando se pueda definir un error concreto, ya que por ecuaciones es prácticamente nulo dependerá de los errores de los componentes.

3.8.3 Acondicionador de señales del multi sensor de gases CH₄, CO₃ y NH₃

El multi detector termofílico TS4x200B-A-S1.5, genera voltajes muy bajos en el orden de los micro volts se requiere dividir el circuito acondicionador en dos etapas, la primera eleva y filtra de ruidos las señales de los detectores y del termistor de micro volts a milivolts y la segunda de milivolts a volts, además de multiplexar las señales para su procesamiento con el circuito LMP91051.

Primera etapa del circuito acondicionador de señal para los detectores termopilas, acondicionador de señal del termistor NTC y circuito de potencia para el emisor de IR

En esta primera etapa se diseñaron los circuitos de la primera etapa de acondicionamiento de señal, para los detectores termopilas, del termistor NTC, y el circuito de potencia del emisor de IR.

a) Acondicionador de señal de los detectores termopilas

Con el fin de ahorrar espacio se diseñó el circuito amplificador también conocido como filtro pasa bajos, que eliminan ruidos o espurios en altas frecuencias.

Los detectores termopilas tienen resistencia interna para cada canal de 65 kΩ. El circuito diseñado se muestra en la Figura 3.33. La resistencia interna y el capacitor externo de 8.2 nF forman un circuito filtro pasa bajo tipo RC, con una frecuencia de corte a -3dB:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2 \times \pi \times 65 \text{ k}\Omega \times 8.2 \text{ nF}} \approx 298.6 \text{ Hz} \quad \text{Ec. 70}$$

La ganancia del circuito es de:

La frecuencia de corte máxima para NDIR es de 5Hz, y el mínimo del ancho de pulso de medio ciclo es por lo tanto de 100 ms. El ajuste a 22 bits es aproximadamente 0.1 veces el mínimo del ancho de pulso de corte.

El AD8629 tiene un ruido de entrada de voltaje de 0.1 Hz hasta 10 Hz de 0.5 μV p-p. Ignorando el ruido del voltaje del sensor y la corriente de ruido del AD8629, a un voltaje de salida de 1mV p-p se produce un ratio de señal ruido (SNR) de:

$$SNR = 20 \log \frac{1mV}{0.5\mu V} \approx 66 \text{ dB} \quad \text{Ec. 75}$$

Se requieren de cuatro circuitos una para cada detector termopila, el circuito completo se muestra más adelante.

b) Acondicionador de seña para el termistor NTC

Las características del termistor NTC integrado en el sensor TS4x200B-A-S1.5, son las siguientes:

$$R_{TH} = 30 \text{ k}\Omega$$
$$\beta = 3940$$

El circuito Thévenin equivalente para el acondicionador de señal del termistor se muestra en la Figura 3.34, la resistencia R3 en serie con la resistencia del termistor forman un divisor de voltaje, alimentado con 670.3 mV. El voltaje de en el circuito es 670.3 mV – 200 mV = 470.3 mV.

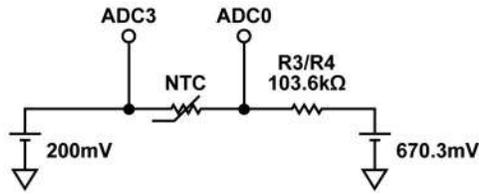


Figura 3.34 Acondicionador de señal para el termistor NTC

Cuando $R_{TH} = 30\text{ k}\Omega$ a 25°C , el voltaje en el termistor es de 231 mV.

El circuito completo de la primera etapa ya con el acondicionamiento de señal para cada de detector termopila se muestra en la Figura 3.35.

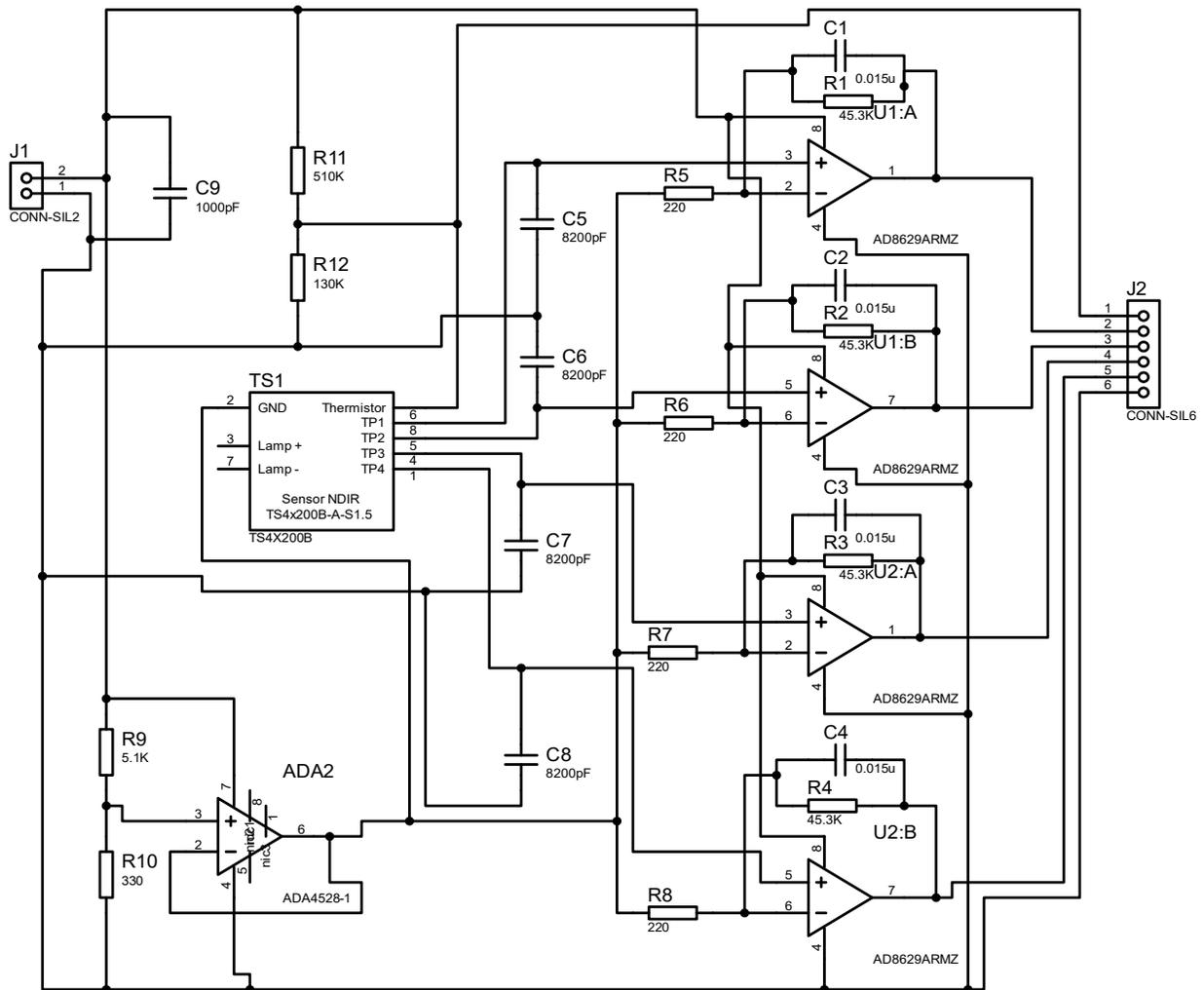
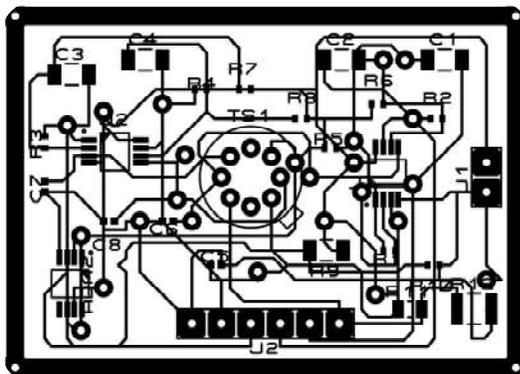


Figura 3.35 Circuito completo de los acondicionadores de señal

La salida del conector J2, de la Figura 3.36 están las salidas pre-amplificadas de los detectores termopilas: J2-1 es la salida del termistor, J2-2 es la salida del detector de referencia, J2-3 es la salida del detector de CO₂, J2-4 es la salida del detector de NH₃, J2-5 es la salida del detector de CH₄ y J2-6 es tierra.

Como el voltaje de las salidas de este circuito todavía es bajo (mV) para ser procesado se envía a una segunda etapa de amplificación, se elevan los voltajes hasta 2 volts aproximadamente como máximo.

Para evitar las interferencias, el circuito impreso se diseñó y se desarrolló con microcomponentes (Figura 3.13), para tener la menor interferencia posible.



(a) Diseño



(b) Desarrollo

Figura 3.36 Diseño de circuito impreso (a) y desarrollo del circuito impreso de la primera etapa

El montaje quedó a un lado del cuerpo del sensor de gases como se muestra la Figura 3.37. Para eliminar la posibilidad de ruido electromagnético o espurios generados por el resto del circuito.

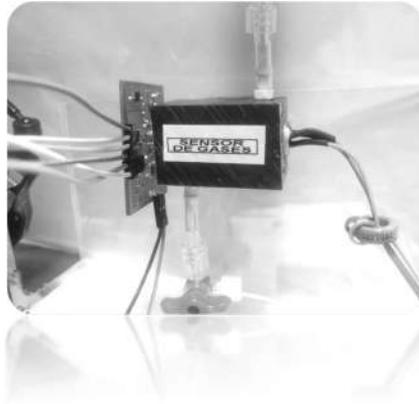


Figura 3.37 Montaje del circuito acondicionador de señal primera etapa, en el sensor multigases

C) Circuito de potencia de la fuente de IR

Para el circuito controlador del emisor de luz infrarroja se utilizó una fuente de voltaje de 3.3volts diferente a la del circuito acondicionador de señal, para evitar inducciones parasitas al sistema.

La resistencia interna de la fuente de luz infrarroja JSIR350-5-BL-R-D3.6-0-0, es de 40Ω , es alimentado con 2.8 V, consume una corriente de 63 mA. Es controlado con el MOSFET BSP75GTA como se muestra en la Figura 3.38.

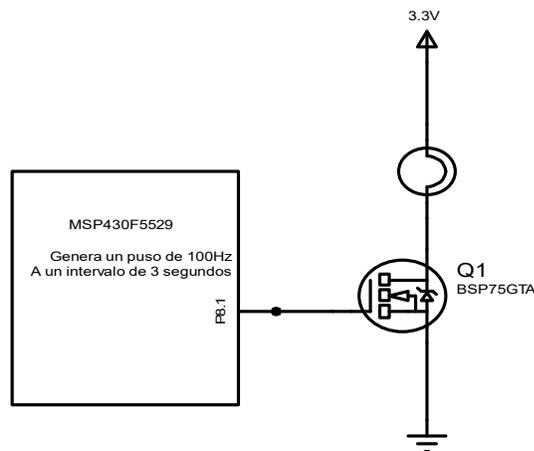


Figura 3.38 Circuito de potencia de la fuente de IR JSIR350-5-BL-R-D3.6-0-0

La frecuencia de 100 Hz es generada por el microcontrolador MSP430F5529, a través del pin 8.1 en intervalos de 0.5 Hz.

Una vez diseñado y desarrollado el circuito electrónico de la primera etapa y controlador de emisor de IR, se realizaron pruebas de comportamiento con aire seco.

Respuesta en frecuencia de 0.5 Hz, acondicionadores de señal (primera etapa) y controlador de emisor de luz IR

La respuesta del sensor con aire seco, como prueba inicial se muestran en la Figura 3.39, 3.40 y 3.41. En la Figura 3.16 la señal superior es del detector de CH₄, con un voltaje de salida de 100 mV_{P-P}, la señal inferior es del detector de referencia con voltaje de salida de 60 mV_{P-P}. La respuesta que se aprecia es aplicando un tren de pulsos de 3.3V a 2 Hz al emisor de infrarrojo. El instrumento de medición fue un osciloscopio marca BK Precisión modelo 2190 de dos canales.

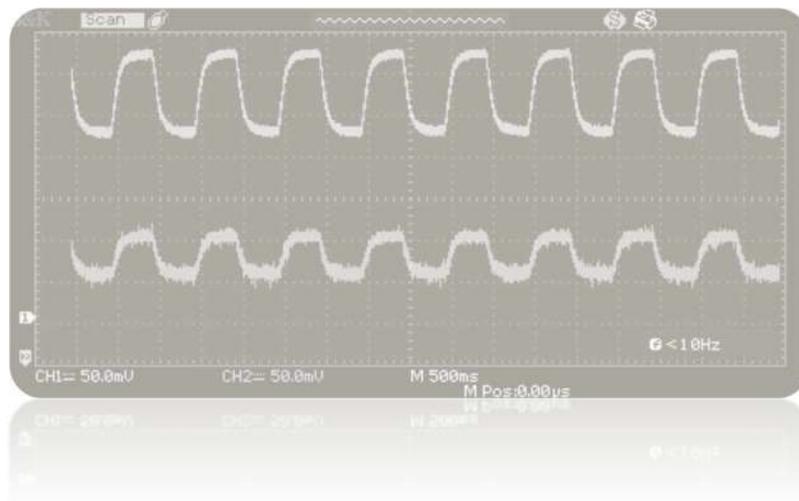


Figura 3.39 Respuesta de la primera etapa de acondicionamiento de señal, detectores de CH₄ (línea superior) y referencia (línea inferior)

La respuesta de salida para NH₃ (Figura 3.17), fue de 32mV_{P-P} a mínima concentración y 60 mV_{P-P} en la salida de referencia, bajo las mismas condiciones del CH₄.

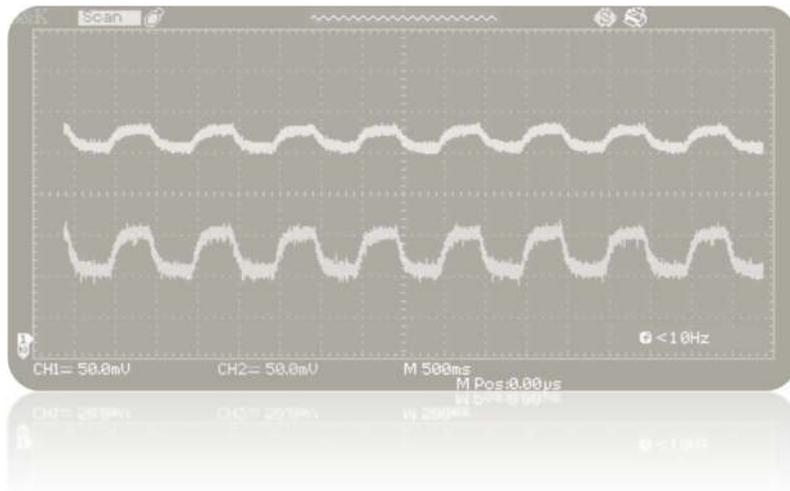


Figura 3.40 Respuesta de la primera etapa de acondicionamiento de señal, detectores de NH_3 (línea superior) y referencia (línea inferior)

La respuesta para el CO_2 , como se muestra en la Figura 3.18, fue de $74 \text{ mV}_{\text{P-P}}$ (línea superior) y $60 \text{ mV}_{\text{P-P}}$ para la señal de referencia.

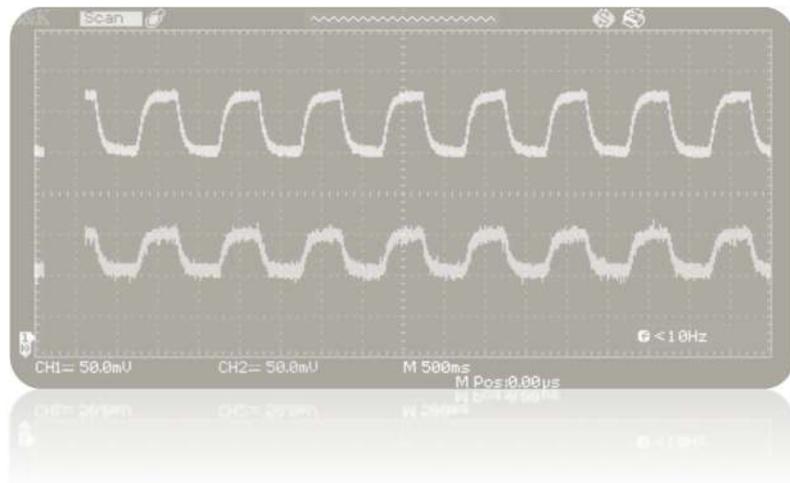


Figura 3.41 Respuesta de la primera etapa de acondicionamiento de señal, detectores de CO_2 (línea superior) y referencia (línea inferior)

Los voltajes de pico a pico son diferentes debido a la transmitancia y al ancho de banda de los filtros de cada detector.

El circuito MSP1 es el procesador Texas Instruments MSP430F5529, que adquiere los valores de los detectores y de temperatura para después procesarlos mediante el algoritmo de Beet-Lambert, que se describe más adelante y posteriormente envía los resultados mediante el protocolo I²C al procesador principal.

El circuito integrado LMP91051 está diseñado para solo la detección de un gas (TI, 2013), por lo cual se diseñó el circuito mostrado en la Figura 3.8, agregando un multiplexor de 8 a 1 Texas Instruments MUX508 para secuenciar las lecturas de los 3 detectores, con lo que se ahorra espacio, menos componentes que se traduce en ahorro económico, porque de lo contrario se necesitarían tres acondicionadores y más entradas en el procesador, además habría otro problema con la señal de referencia que podría colapsar con el uso de los tres circuitos.

En la Figura 3.43 se muestra el diseño del circuito impreso de la segunda etapa.

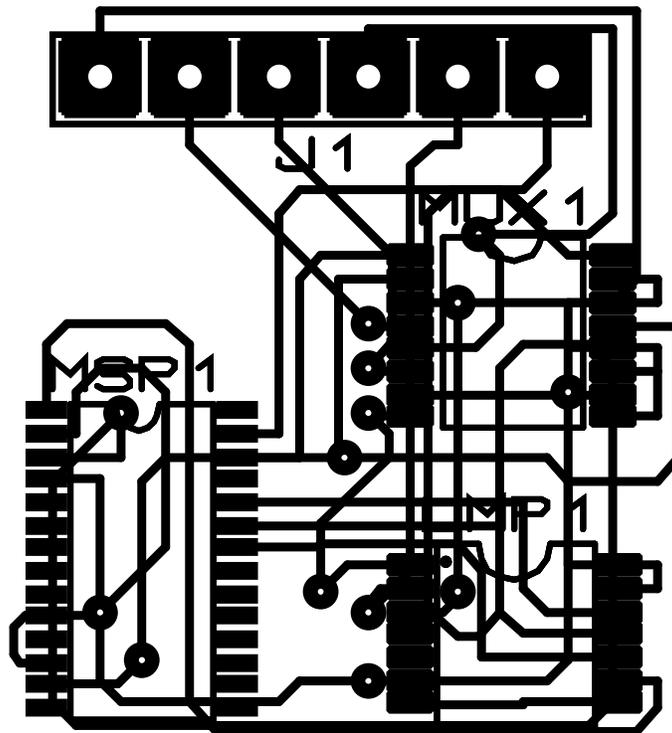


Figura 3.43 Diseño del circuito impreso de la segunda etapa

3.9 ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE DATOS (ALGORITMOS DE PROGRAMACIÓN PARA CALIBRACIÓN Y OPERACIÓN)

Después de analizar la literatura de diversos fabricantes de microcontroladores, sistemas mínimos, FPGA's, etc. (Microchip, 2018; Raspberry, 2018; Microsoft, 2018, Altera, 2018; Texas Instruments, 2018). Se seleccionó como procesador maestro al sistema Raspberry Pi 3, por su velocidad de procesamiento, capacidad de almacenamiento, y los periféricos que posee, como ethernet, wi-fi, GPIO (salidas y entradas de propósito general, por sus siglas en inglés General Purpose Inputs and Outputs), puertos de comunicación I²C, USART, entre otros, lo más importante es su bajo costo de alrededor de los 35 USD con una gran capacidad de procesamiento y almacenamiento, ver Figura 3.44.

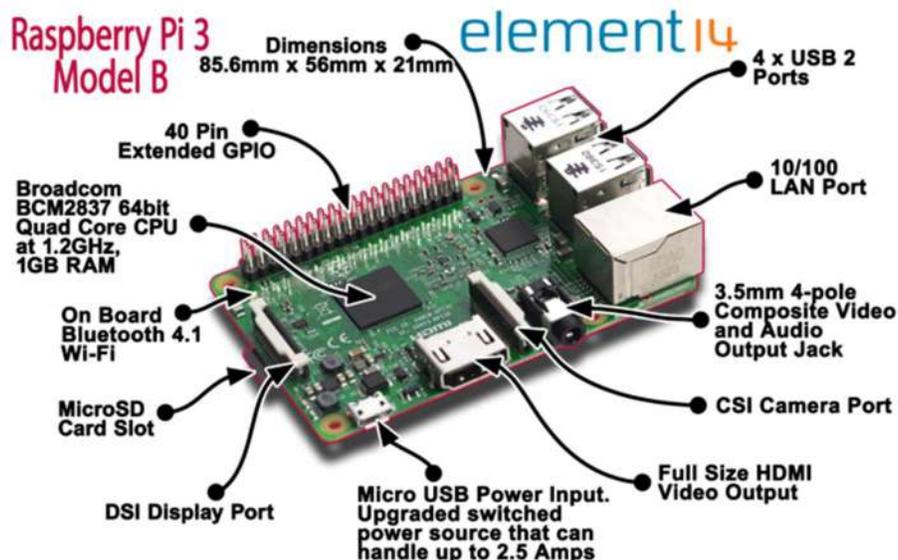


Figura 3.44 Raspberry Pi 3

Al no contar con un convertidor analógico a digital (Raspberry, 2016), se eligió uno con resolución de 16 bits para mayor precisión y menos error, con puerto de comunicación I²C, que permite tener hasta 128 dispositivos conectados a un mismo bus (NPX, 2014), el dispositivo es el ADS1115 de Texas Instruments, que además posee de acondicionamiento de señal básico por medio de amplificación de la señal de entrada.

El Sistema Raspberry puede operar con dos sistemas operativos, el Linux Raspbian o Ubuntu, y con Windows IoT. Después de analizar las ventajas y desventajas: LINUX está diseñado para aplicaciones de entretenimiento y programación básica y el Windows IoT está diseñado para trabajar en aplicaciones dedicadas, y para almacenar datos en internet, lo que lo hace más rápido y eficiente, razones por la cual se seleccionó este sistema operativo (Raspberry, 2016; Microsoft, 2016).

Una vez seleccionado el sistema de adquisición de datos, se programó en Windows IoT y Raspberry. En Visual Studio, con XAML y C#.

Los procesadores para subprocessos (esclavo), medición y calibración de gases, temperatura y pH, se seleccionó el microcontrolador MSP430F5529, con las características mencionadas en los antecedentes, esta diseñado para el procesamiento de señales de sensores de gases y pH, los procesamientos son como se describen en los algoritmos, todos los datos seon enviados al procesador maestro mediante el protocolo de comunicación I²C y UART (Universal Serial Reciever and Trasnsiever).

3.9.1 Algoritmo de Calibración y medición para sensor de temperatura

Se tomarán como base los valores de voltajes en la entrada del ADC esperados en escala media de cada rango, esto es para la escala de 0 a 19 °C, se tomará el valor esperado de voltaje de entrada para 10 °C, para 20 a 39°C, 30 °C y para 40 a 60°C, 50°C, usando la ecuación de división de voltaje:

$$V_{Termistor} = \frac{V_{DD} * R_{termistor}}{56 k\Omega + R_{termistor}} \quad \text{Ec. 76}$$

Dónde: $V_{termistor}$ = Voltaje esperado

V_{DD} = Voltaje de alimentación 3.3 V

$R_{termistor}$ = Resistencia del termistor a 10, 30 y 50 °C

Los resultados esperados se muestran en la tabla 3.18.

Tabla 3.18 Voltajes esperados en termistor

| Temperatura | Resistencia en kΩ | Voltaje esperado (V_{esp}) en Volts |
|-------------|-------------------|---|
| 10°C | 58.30000 | 1.683202 |
| 30°C | 24.44600 | 1.002807 |
| 50 °C | 11.14564 | 0.547774 |

Los voltajes de ajuste son:

$$V_{aj10} = V_{esp10} - V_{lect} \quad \text{Ec. 77}$$

$$V_{aj30} = V_{esp30} - V_{lect} \quad \text{Ec. 78}$$

$$V_{aj50} = V_{esp50} - V_{lect} \quad \text{Ec. 79}$$

Dónde: V_{aj10} , V_{aj30} y V_{aj50} son los voltajes de ajuste

V_{esp10} , V_{esp30} y V_{esp50} son los voltajes esperados en cada rango

V_{lect} = voltaje de entrada del ADC

Estos voltajes se suman al voltaje de entrada en el modo de lectura de tal manera que los voltajes ajustados para cada rango son:

$$V_{inaj10} = V_{in} + V_{aj10} \quad \text{Ec. 80}$$

$$V_{inaj30} = V_{in} + V_{aj30} \quad \text{Ec. 81}$$

$$V_{inaj50} = V_{in} + V_{aj50} \quad \text{Ec. 82}$$

Con los datos anteriores y ecuaciones se elaboró el algoritmo de programación para la medición y calibración de temperatura, en figura 3.45 se muestra la secuencia que se debe seguir para calibrar los tres puntos medios de cada curva logarítmica, el punto es central en la curva para que el ajuste sea adecuado a lo largo de toda la trayectoria. La

figura 3.46 da la secuencia para la medición de la temperatura haciendo los ajustes correspondientes según la curva, con lo que se minimiza el error y se logra una adecuada precisión.

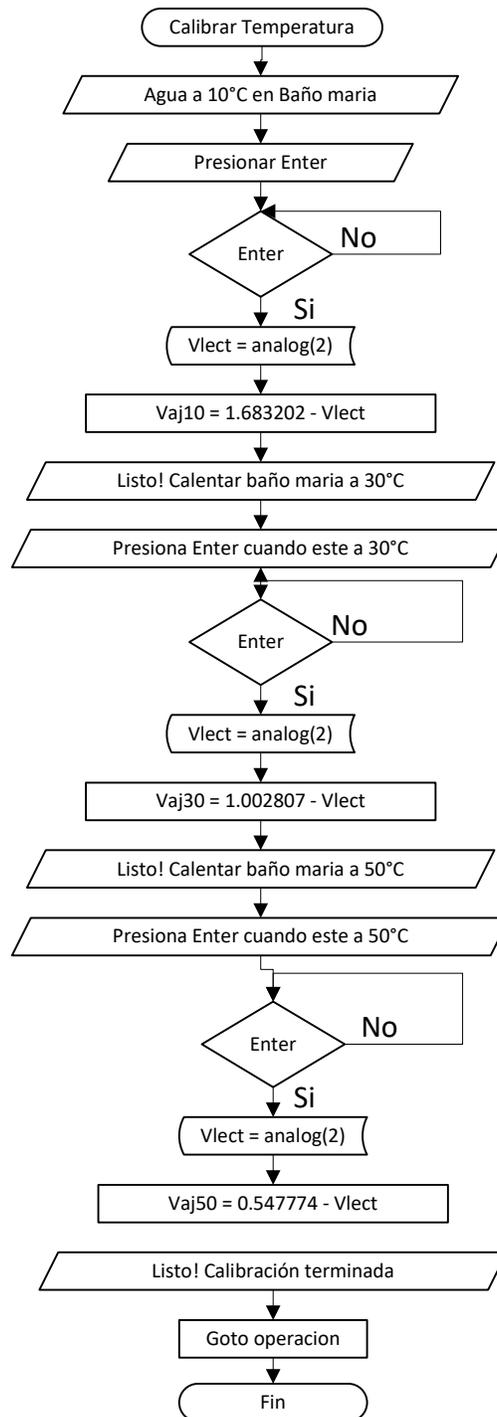


Figura 3.45 Algoritmo de programación para calibración del sensor de temperatura

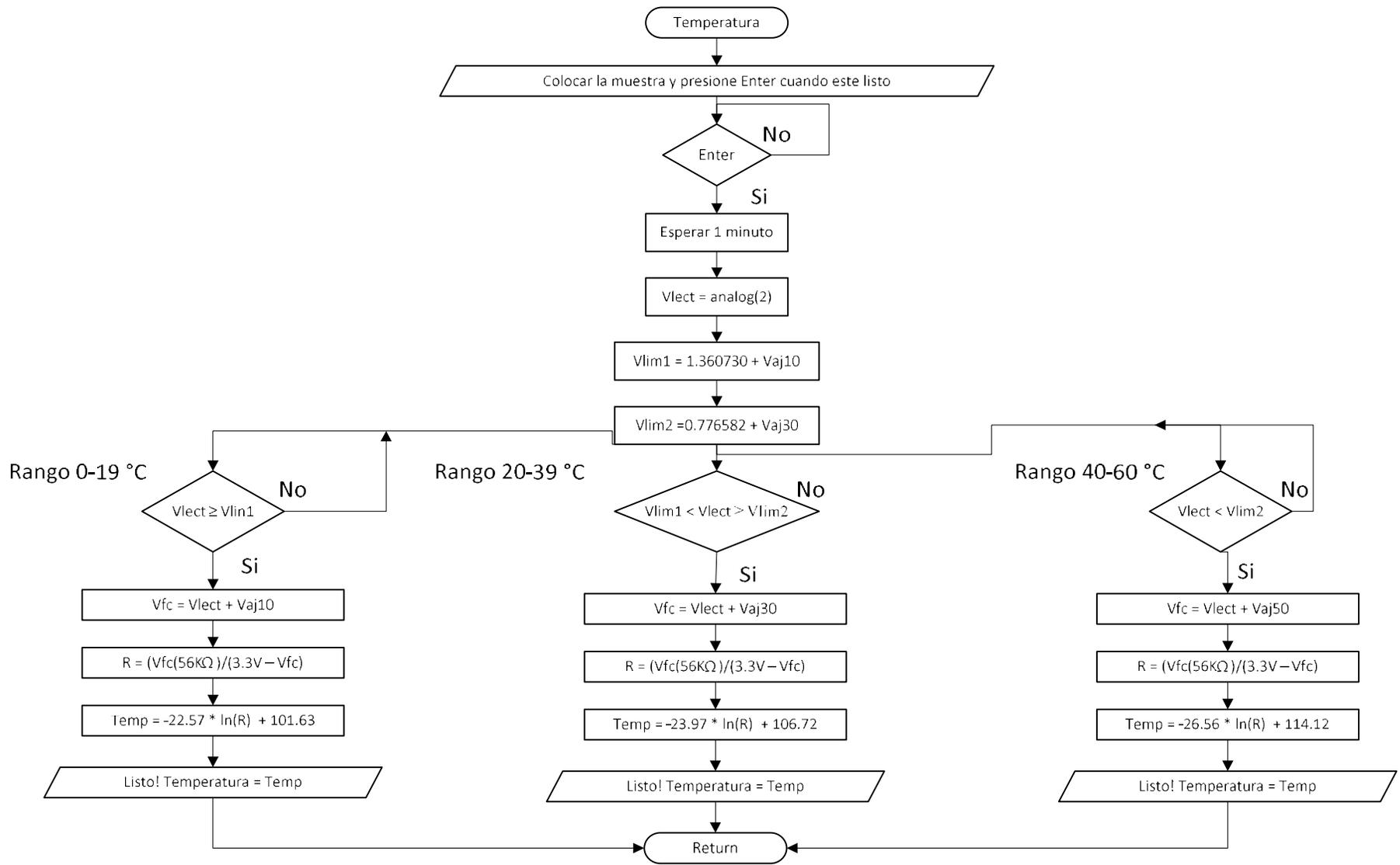


Figura 3.46 Algoritmo de programación para medición de temperatura

3.9.2 Algoritmos de calibración y medición del sensor de pH

Con la información del capítulo 3.8.2 de la página 90 se desarrolló el algoritmo de programación para la calibración de pH con factor de corrección (ver Figura 3.47).

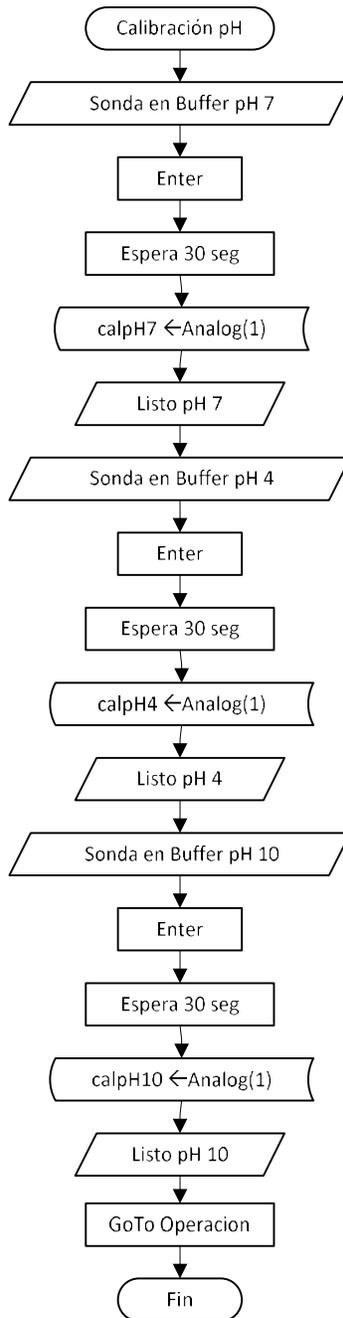


Figura 3.47 Algoritmo para calibrar sensor de pH

El algoritmo de la medición de pH se muestra en la figura 3.48.

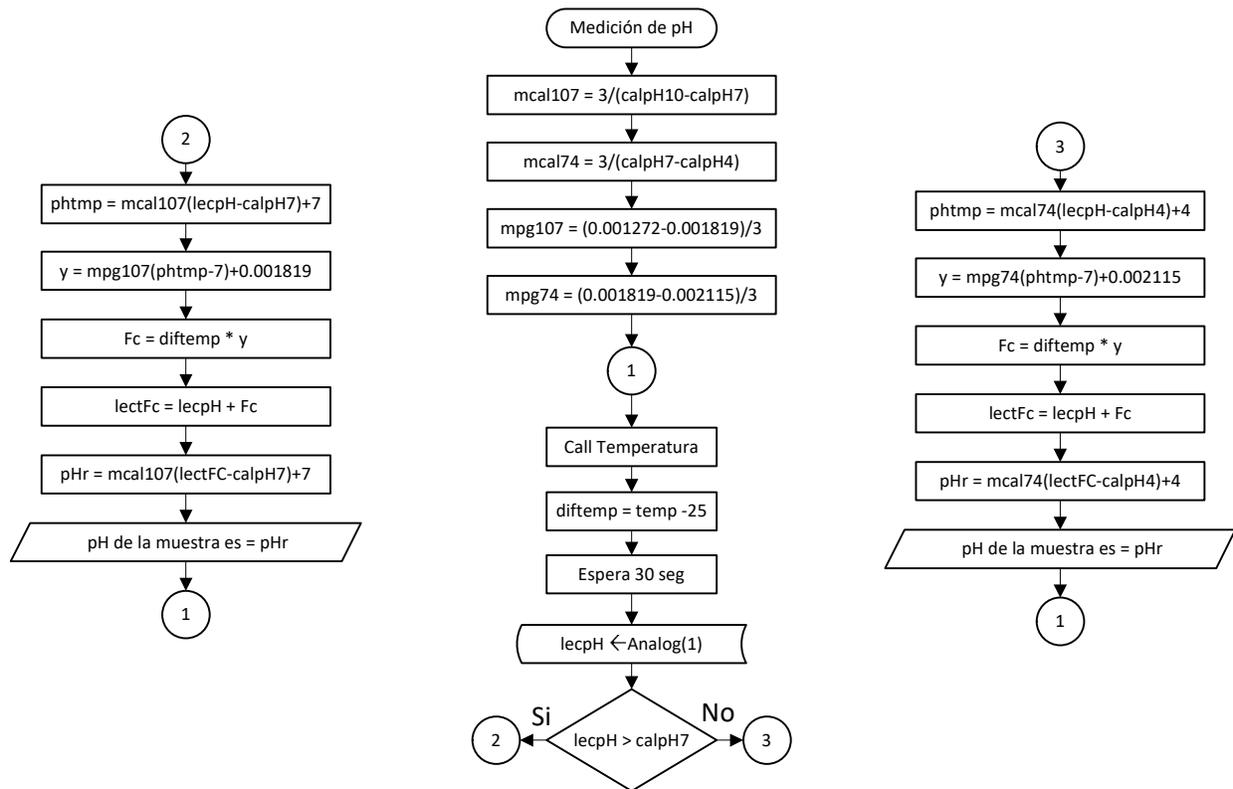


Figura 3.48 Algoritmo para medición de pH

3.9.3 Algoritmo de programación para el multi sensor de gases para el Microcontrolador MSP430F5529

Una vez acondicionada la señal de los detectores termopilas se procedió a realizar el algoritmo de programación, para procesar los datos de los detectores y el termistor, para calibración y la determinación de concentraciones de gases. Los resultados son enviados por el protocolo I²C al procesador principal, que en este caso es un Raspberry Pi 3, donde se muestran los resultados en forma de texto.

a) Sincronización y muestreo

Para medir las concentraciones de los gases, los valores de las señales pico a pico de los detectores activos como el de referencia, deben ser amplificados por el

acondicionador LMP91051, a un nivel de voltaje adecuado para su correcto muestreo sin distorsionar las señales, los factores de ganancia de este circuito van de 4 a 2000, El uso de filtros pasa bajos es indispensable en ambas etapas de acondicionamiento de señal, para eliminar cualquier interferencia o espurio generado dentro del sistema.

La frecuencia de corte se fijó a 0.83 Hz, que fue la óptima para él sensor y la velocidad de muestreo a 30 Hz. Aunque la frecuencia de corte puede ser ajustada de 0.1 Hz a 5 Hz y la velocidad de muestreo de 3.5 Hz a 483 Hz. Siempre considerando que la velocidad de muestreo sea 30 veces más que la frecuencia de corte (AD,2018 y TI,2018). Los valores máximos y mínimos de los detectores deben adquirirse 330 ms para el máximo y 900 ms para el mínimo después de iniciar el ciclo como se muestra en la Figura 2.21, la temperatura puede tomarse durante los 50 mS del tiempo de blanqueo. Para la obtención de estos valores se realizaron pruebas a diferentes frecuencias de 0.25 Hz a 5 Hz, observando la respuesta en el osciloscopio BK PRECISION, modelo 2190D, se analizó la respuesta de los cuatro detectores, en la salida de la segunda etapa acondicionadora de señal y de filtraje, se resume el análisis en la Figura 2.49. A menor frecuencia la respuesta de los detectores termopilas se saturan y a mayor frecuencia no se les da tiempo a la estabilización. Para este sensor en particular la frecuencia optima como ya se menciono es de 0.83 Hz.

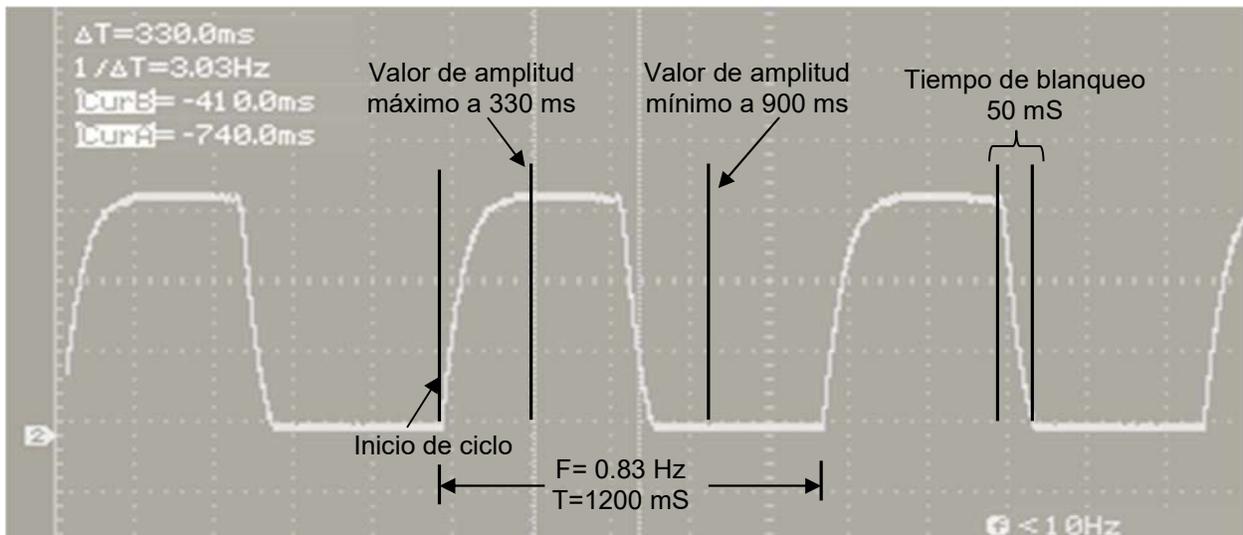


Figura 2.49 Tiempos para adquisición de valores máximos y mínimos

b) Algoritmo del procedimiento de calibración y operación (Ecuación ideal de Lambert-Beer):

Por las diferencias de las características de las fuentes de IR y los detectores termopilas, el circuito debe ser calibrado inicialmente y cada vez que se cambie la fuente de IR o los detectores.

Este procedimiento es para cada gas, se deben introducir los gases de tal manera que fluya por la cámara interna del sensor hasta que cualquier gas anterior salga del sistema. Después de que se establezca durante algunos minutos, las mediciones pueden hacerse.

El método de calibración y algoritmo son mostrados a continuación siguiendo los pasos para la ecuación ideal de Lambert-Beer:

- i. Poner en modo de calibración inicial el sistema.
- ii. Inyectar el gas de baja concentración o gas CERO (Nitrógeno), x_{LOW} , y esperar a que se establezca la cámara.
- iii. El sistema adquiere y almacena ACT_{LOW} y REF_{LOW} . Los valores de pico a pico en el detector activo y de referencia en baja concentración de gas.
- iv. El sistema adquiere y almacena la temperatura del gas en baja concentración, T_{LOW} .
- v. Inyectar las altas concentraciones de cada gas, x_{CAL} , en la cámara (cuando corresponda a cada uno CH_4 , CO_2 y NH_3).
- vi. El sistema adquiere y almacena ACT_{CAL} , REF_{CAL} , (de cada gas en su momento) y la temperatura de calibración, T_{CAL} .
- vii. El sistema calcula y almacena CERO y b:

$$CERO = \frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \left(\frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \frac{REF_{CAL}}{ACT_{CAL}} \right)^{\frac{x_{LOW}}{x_{CAL} - x_{LOW}}} \quad \text{Ec. 83}$$

$$b = \left[\frac{\ln \left(\frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \frac{REF_{CAL}}{ACT_{CAL}} \right)}{x_{CAL} - x_{LOW}} \right] \quad \text{Ec. 84}$$

Para el modo de operación para medir una concentración de gases desconocida, usando la ecuación ideal de Lambert-Beer, se hace lo siguiente:

- i. Inyectar el gas a medir y esperar a que se estabilice la cámara.
- ii. Adquirir y almacenar ACT y REF, los valores de pico a pico de los detectores activos y de referencia.
- iii. Adquirir y almacenar la temperatura del gas T, en grados Kelvin.
- iv. Usar el valor CERO de la calibración.
- v. Usar el valor b de la calibración
- vi. Calcular la absorbancia:

$$A = 1 - \frac{ACT}{REF \times CERO} \quad \text{Ec. 85}$$

- vi. Calcular la concentración aplicando la ecuación de gases ideales para la compensación de temperatura:

$$x = \frac{T}{T_{LOW}} \left[\frac{\ln \left(\frac{ACT}{REF \times CERO} \right)}{-b} \right] \quad \text{Ec. 86}$$

Se asume que $T_{LOW} = T_{CAL}$.

C) Algoritmo del procedimiento de calibración y operación (Ecuación ideal de Lambert-Beer modificada):

Si las constantes b y c son conocidas se puede usar el siguiente procedimiento para mayor precisión:

Poner en modo de calibración inicial el sistema.

- i. Inyectar el gas de baja concentración o gas CERO (Nitrógeno), x_{LOW} , y esperar a que se estabilice la cámara.
- ii. Es sistema adquiere y almacena ACT_{LOW} y REF_{LOW} . Los valores de pico a pico en el detector activo y de referencia en baja concentración de gas.
- iii. El sistema adquiere y almacena la temperatura del gas en baja concentración, T_{LOW} .
- iv. Inyectar las altas concentraciones de cada gas, x_{CAL} , en la cámara (cuando corresponda a cada uno CH_4 , CO_2 y NH_3).
- v. El sistema adquiere y almacena ACT_{CAL} , REF_{CAL} , (de cada gas en su momento) y la temperatura de calibración, T_{CAL} .
- vi. El sistema calcula y almacena CERO y SPAN:

$$CERO = \frac{ACT_{LOW}(e^{-b(x_{cal}^c)} - 1)REF_{CAL} + ACT_{CAL}(1 - e^{-b(x_{low}^c - 1)})REF_{LOW}}{(e^{-b(x_{cal}^c)} - e^{-b(x_{low}^c)}) \times REF_{CAL} \times REF_{LOW}} \quad \text{Ec. 87}$$

$$SPAN = \frac{ACT_{CAL} \times REF_{LOW} - ACT_{LOW} \times REF_{LOW}}{ACT_{LOW}(e^{-b(x_{cal}^c)} - 1)REF_{CAL} + ACT_{CAL}(1 - e^{-b(x_{low}^c - 1)})REF_{LOW}} \quad \text{Ec. 88}$$

Para el modo de operación para determinar una concentración de gases desconocida, usando la ecuación ideal de Lambert-Beer, se hace lo siguiente:

- i. Inyectar la mezcla de gases a determinar, esperar a que se estabilice la cámara.

- ii. Adquirir y almacenar ACT y REF, los valores de pico a pico de los detectores activos y de referencia.
- iii. Adquirir y almacenar la temperatura del gas T, en grados Kelvin.
- iv. Usar el valor CERO de la calibración.
- v. Usar el valor b de la calibración
- vi. Calcular la absorbancia:

$$A = 1 - \frac{ACT}{REF \times CERO} \quad \text{Ec. 89}$$

- vii. Calcular la concentración aplicando la ecuación de gases ideales para la compensación de temperatura:

$$x = \frac{T}{T_{LOW}} \left[\frac{\ln \left(1 - \frac{A}{SPAN} \right)}{-b} \right]^{\frac{1}{c}} \quad \text{Ec. 90}$$

Se asume que $T_{LOW} = T_{CAL}$.

D) Algoritmo para el cálculo de temperatura con el termistor NTC

El circuito del termistor NTC se muestra en la Figura 3.50

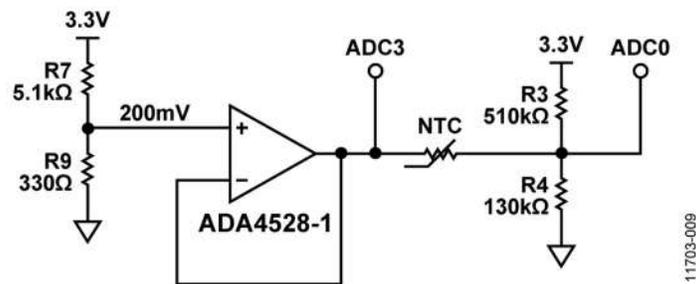


Figura 3.50 Circuito del termistor NTC

El voltaje en el termistor es:

$$V_{NTC} = \frac{(R4 * R7X - R3 * R9) * R_{NTC} * VCC}{(R7 * R9)[R3(R4 + R_{NTC})]} \quad \text{Ec. 91}$$

donde:

VCC es 3.3 V.

R_{NTC} es la resistencia del termistor.

La resistencia del termistor se expresa como:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} * \ln \frac{R_{NTC}}{R_{TH}} \quad \text{Ec. 92}$$

donde:

R_{TH} es la resistencia del termistor a temperatura T₀.

β es el parámetro tomado en la hoja de datos del termistor.

R_{NTC} es la resistencia del termistor a temperatura T.

Combinando ambas ecuaciones tenemos que:

$$T = \frac{T_0 * \beta}{\beta + T_0 * \ln \left[\frac{R3 * R4 * (R7 + R9) * V_{NTC}}{(R4 * R7 - R3 * R9) * R_{TH} * VCC - (R3 + R4) * (R7 + R9) * R_{TH} * V_{NTC}} \right]} \quad \text{Ec. 93}$$

Durante cada intervalo de blanqueo, se debe adquirir y almacenar la temperatura como de muestra en la Figura 3.51.

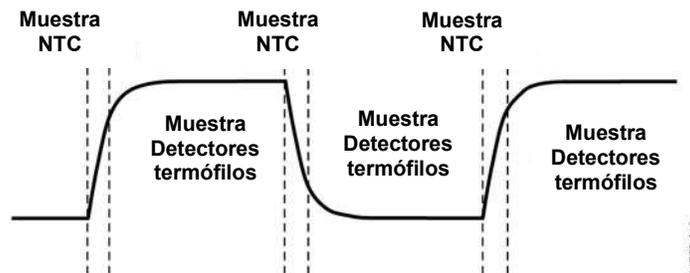


Figura 3.51 Muestreo del termistor y ciclo de la fuente de IR

3.9.4 Diseño del algoritmo para la medición del volumen en el sistema de extracción de gases del *InSite 100*, en los modos abierto y cerrado (recirculación).

A continuación, se muestran los dos modos básicos de operación desarrollados para la extracción de gases en sedimentos o líquidos y los algoritmos de programación para el control y proceso de los datos del sistema.

a) Modo del sistema abierto con aire

El sistema abierto con aire se configura como se indica en la Figura 3.52. La muestra de hasta 500 mL de sedimento o líquido se introduce por el ducto de entrada (1) y se tapa. Se cierra la electroválvula (14), se abren las electroválvulas (15) y (18), se requiere quitar el tanque de nitrógeno (17). Se mide la presión inicial (11) y la temperatura inicial (12), el volumen inicial del sistema es la suma de los volúmenes de paso de gases del extractor, mangueras, sensores, bomba, filtros y electroválvulas. Si se requiere medir el pH (6), la conductividad eléctrica (7) y la temperatura de la muestra, los electrodos para tales mediciones deben introducirse antes de la muestra en los ductos (6) y (7), si no son requeridas estas mediciones se deben tapar dichos ductos, con tapones de hule. Se activa la bomba de recirculación (13), durante unos segundos. Se activa el transductor de ultrasonido, la energía vibratoria generada se disipa sobre la muestra por medio de la placa de acero inoxidable y las paletas disipadoras (3). Los gases salen por el ducto (5), pasan por los filtros (8) y (9), que retienen la humedad para evitar interferencias y daños en los dispositivos de medición. Los gases pasan por los sensores (10), se registran continuamente las lecturas de las concentraciones de los gases, para determinar el incremento del volumen se sigue el procedimiento que se describe más adelante. Los gases salen a la atmosfera por el conducto de salida (16). El proceso termina (entre 5 y 10 minutos aproximadamente) las mediciones de concentración de gases llegan a su valor máximo y se estabilizan, llegando al valor mínimo, la concentración de los gases se realiza midiendo el área debajo de la curva, entre los puntos inicial, máximo y mínimo final. Todo el proceso es controlado por el microprocesador (21) y los resultados de

concentraciones de gases, presión, temperatura y volumen se muestran de forma continua por medio de la pantalla (22). [Incluido en la solicitud de patente].

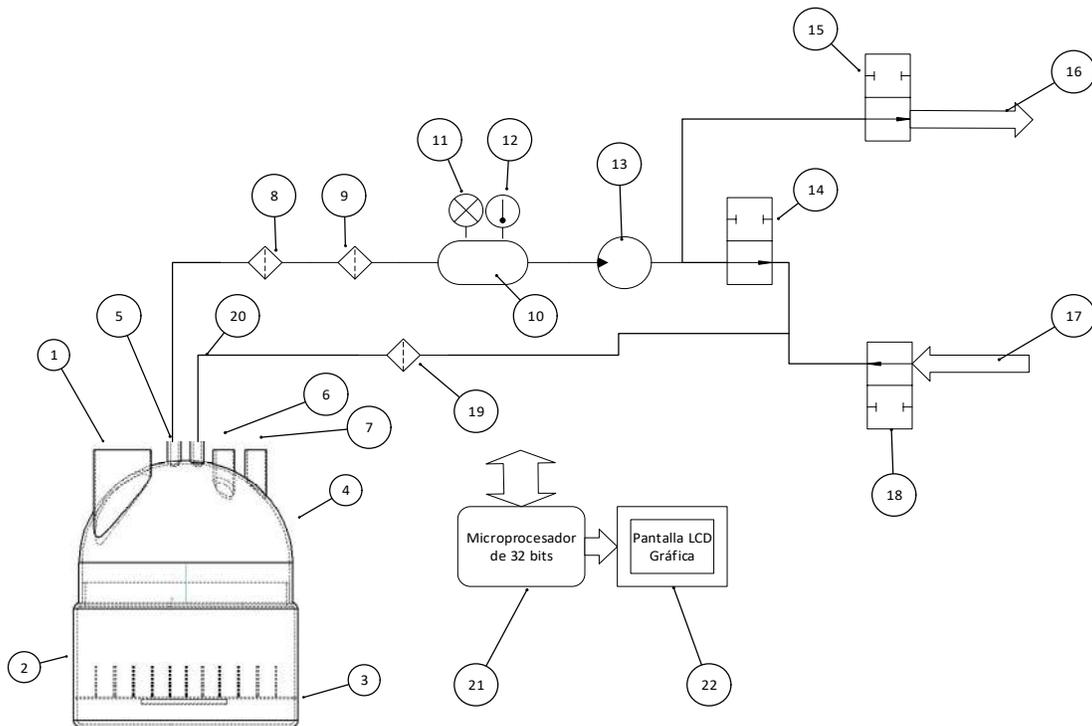


Figura 3.52 Modo de operación sistema abierto con aire (Extraído de la solicitud de patente)

El diseño del algoritmo de programación en modo abierto para la medición del volumen total de cada gas específico (CH_4 , CO_2 , NH_3 y O_2) extraído del sistema, se consideró el flujo de la bomba (CO2Meter, 2018) con un flujo máximo de 500 mL/min Figura 3.53 (13). El sistema tiene filtros de humedad (8), (9) y (19), estos tienden a saturarse obstruyendo el flujo de aire o gas de acarreo, provocando que la bomba disminuya el flujo, afectando los cálculos de volumen, por lo que se tienen que hacer ajustes para corregir el flujo real, para esto se tomaron en cuenta las características del fabricante de la bomba DS-PMP-0010 (Figura 3.53). Es necesario medir el vacío para determinar el flujo y emitir una alarma que indique saturación de filtros, para que sean limpiados o reemplazados.

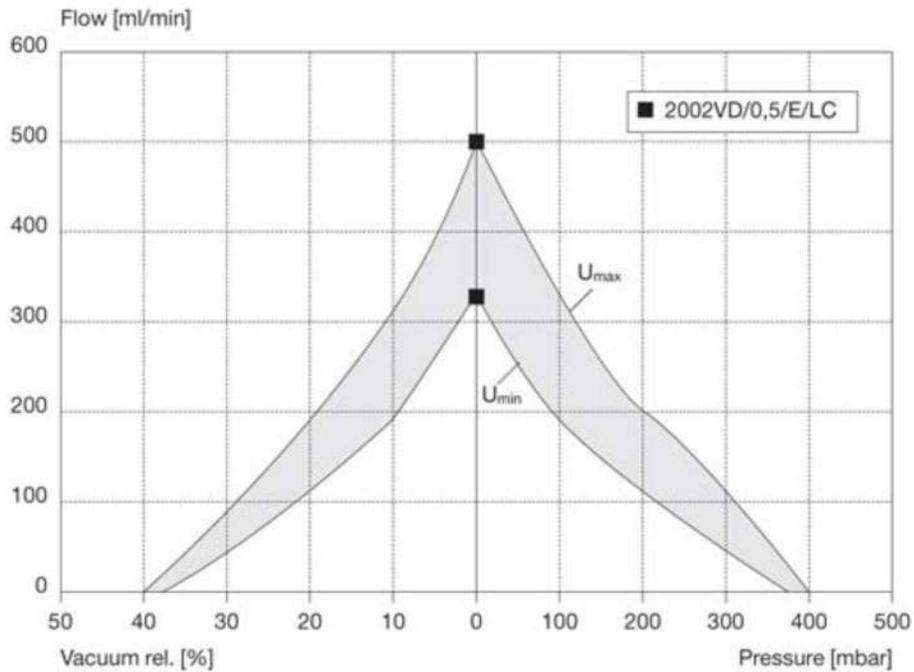


Figura 3.53 Curvas de Flujo de la bomba DS-PMP-0010 (CO2Meter, 2018)

De la Figura 3.6 se calculó la línea de tendencia polinomial de tercer orden para el vacío:

$$Flujo_{Real} = -0.005x^3 + 0.4571x^2 - 22.786x + 499.43 \quad \text{Ec. 94}$$

$$R^2 = 0.9999$$

Donde:

$Flujo_{Real}$ = Flujo real en el sistema

x = Vacío relativo

Para el cálculo del volumen de cada gas a medir, se determina por el porcentaje de los gases en los sensores, el volumen de cuerpo de sensores y el flujo real del sistema, el método diseñado es el siguiente, se tomaran muestras cada segundo, se inicia la sumatoria de volumen cuando se registre la primer variación de concentración de gas

como se muestra en la Figura 3.54, en este caso se registra una pequeña variación en el quinto segundo, se calcula al volumen con las siguientes ecuaciones:

$$Vol_{1s} = \frac{Flujo_{real} (mL)}{60s} \times 1s \quad \text{Ec. 95}$$

Donde:

Vol_{1s} = es el volumen de del flujo de la mezcla de gases en un segundo

$Flujo_{Real}$ = es el flujo real del sistema en mL

Como el volumen del sensor en de 2.23mL, la concentración de gas corresponde a este volumen, se tiene que ajustar al volumen del flujo en un segundo:

$$Vol_{gas \text{ esp sensor}} = (\%Concentracion_{gas} \times 100) \times 2.23mL \quad \text{Ec. 96}$$

Donde:

$Vol_{gas \text{ esp sensor}}$ = volumen de un gas específico dentro del sensor (volumen de 2.23 mL)

$\%Concentración_{gas}$ = porcentaje de concentración de un gas específico medido por el sensor en base al volumen del sensor que es de 2.23mL

El volumen del gas ajustado al flujo del sistema quedaría de la siguiente manera:

$$Vol_{gas \text{ esp ajustado}} = \frac{Vol_{gas \text{ esp sensor}} \times Vol_{1s}}{2.23mL} \quad \text{Ec. 97}$$

Donde:

$Vol_{gas \text{ esp ajustado}}$ = volumen de gas específico ajustado al flujo del sistema

$Vol_{gas \text{ esp sensor}}$ = volumen de gas específico dentro del sensor (volumen de 2.23 mL)

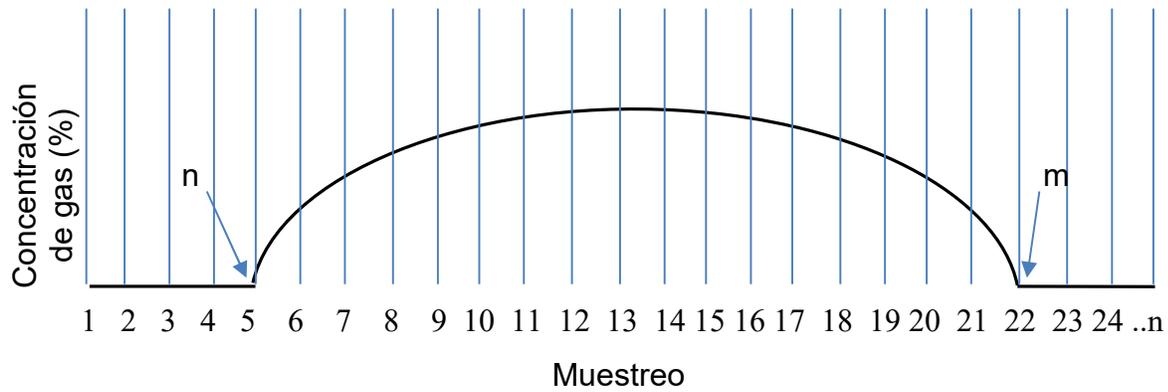


Figura 3.54 Concentraciones de un gas determinado en función muestreo

Las ecuaciones anteriores solo determinan el volumen de un muestreo, para medir el volumen total de la extracción se repetirá hasta el número de muestreos necesarios hasta que el volumen del gas específico llegue a su mínimo de nuevo, en el caso de la Figura 3.7 será hasta el muestreo 22, el volumen total del gas específico (CH_4 , CO_2 , O_2 , o NH_3), se calculara de la siguiente manera (Chassaing y Reay, 2011 y Eiali, 2003):

$$Vol_{gas\ extraido} = \sum_{i=n}^m Vol_{gas\ esp\ ajustado} \quad \text{Ec. 98}$$

Donde:

$Vol_{gas\ extraido}$ = volumen total del gas extraído

m = es m esima muestra cuando se detecta el mínimo de gas

n = es la n esima muestra cuando detecta la primera variación de concentración de gas

$Vol_{gas\ esp\ ajustado}$ = volumen del gas específico ajustado al volumen del flujo en una muestra

El algoritmo de programación del modo abierto desarrollado con las bases anteriores se muestra en la Figura 3.8.

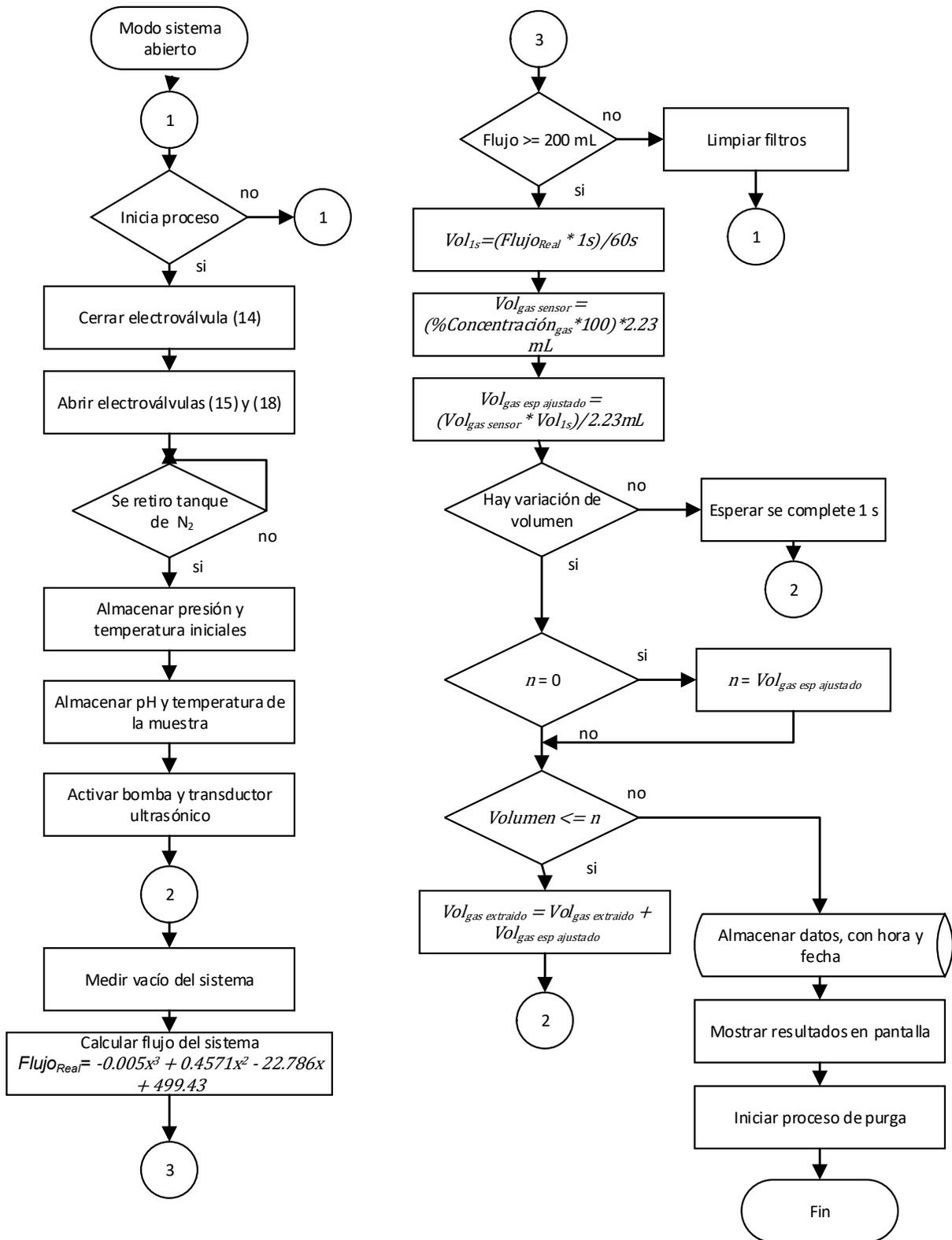


Figura 3.55 Algoritmo de programación en modo abierto

b) Modo cerrado o de recirculación

En el modo de operación cerrado o de recirculación con aire (Figura 3.56), la muestra, que puede ser hasta de 500 mL de sedimento o líquido se introduce por la entrada (1) y se tapa. Se cierran las electroválvulas (15) y (18), se abre la electroválvula (14). Se mide la presión inicial (11) y la temperatura inicial (12), el volumen inicial del sistema es la suma de los volúmenes de paso de gases del extractor, mangueras, sensores, bomba, filtros y electroválvulas. Si se requiere se puede medir el pH (6), la conductividad eléctrica (7) y la temperatura de la muestra, los electrodos para tales mediciones deben introducirse antes de la muestra en los ductos (6) y (7), si no son requeridas estas mediciones se deben tapar dichos ductos, con tapones de hule. Se activa la bomba de recirculación (13), durante unos segundos. Se activa el transductor de ultrasonido, la energía vibratoria generada se disipa sobre la muestra por medio de la placa de acero inoxidable y las paletas disipadoras (3). Los gases salen por el ducto (5), pasan por los filtros (8) y (9), que retienen la humedad para evitar interferencias y daños en los dispositivos de medición. Los gases pasan por los sensores (10), se registran continuamente las lecturas de las concentraciones de los gases, la presión (11) y la temperatura (12), para determinar el incremento del volumen, con referencia a los valores iniciales de volumen, presión y temperatura, basándose en la ecuación 1.4 de Ley general de los gases (Chang, 1999 y Brown *et al.*, 2014). Los gases retornan al extractor pasando primero por el filtro de humedad (19) para evitar fuga de humedad por el mismo al sistema de recirculación. Los gases retornan al sistema por medio del ducto (20). El proceso termina (en un lapso de 5 a 10 minutos aproximadamente), cuando el volumen en el sistema se estabiliza y las mediciones de concentraciones de gases llegan a su valor máximo. Todo el proceso es controlado por el microprocesador (21) y los resultados de concentraciones de gases, presión, temperatura y volumen se muestran de forma continua por medio de la pantalla (22). [Incluido en la solicitud de patente].

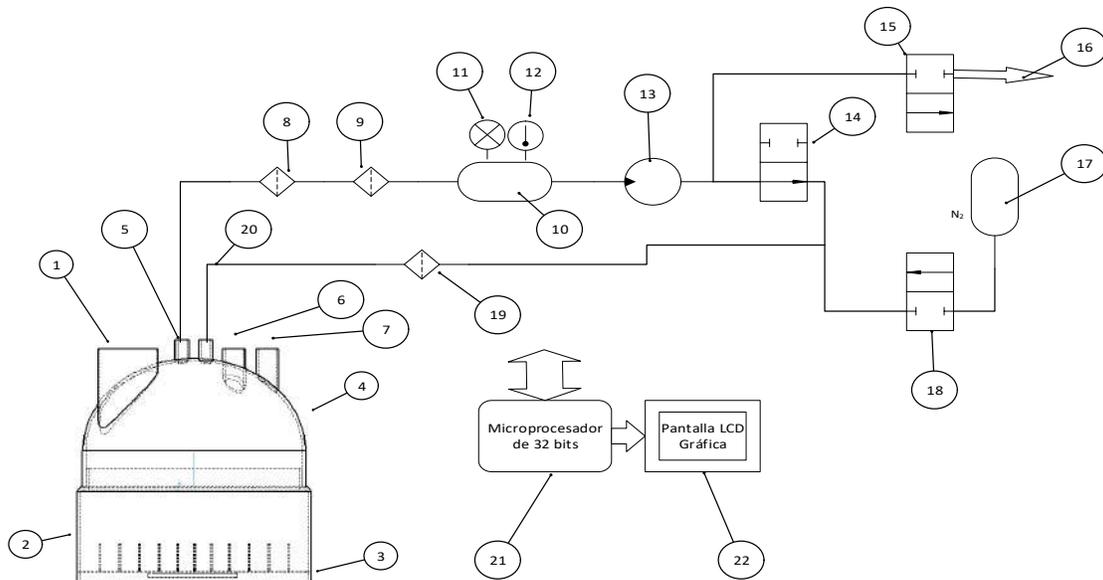


Figura 3.56 Modo de operación cerrado o con recirculación con aire

Los cálculos para determinar el volumen total extraído del sistema, se basa en la ecuación 1.4 de la Ley general de los gases (Chang, 1999 y Brown *et al.*, 2014), cuando el proceso inicia, se registran los valores de presión, volumen y temperatura iniciales. El muestreo mostrado en la Figura 3.57 se utiliza para determinar la concentración mínima n y la máxima m , y detener el proceso cuando se detecten cinco valores máximos consecutivos. Se almacenan las lecturas de presión y temperatura finales, se sustituyen los valores de presión y temperatura iniciales y finales en la ecuación 1.4 para calcular el volumen final del sistema, se aplica el factor de corrección por dilución y se obtiene el volumen del gas específico extraído. Estos cálculos se repiten para cada gas (CH_4 , CO_2 , NH_3 y O_2).

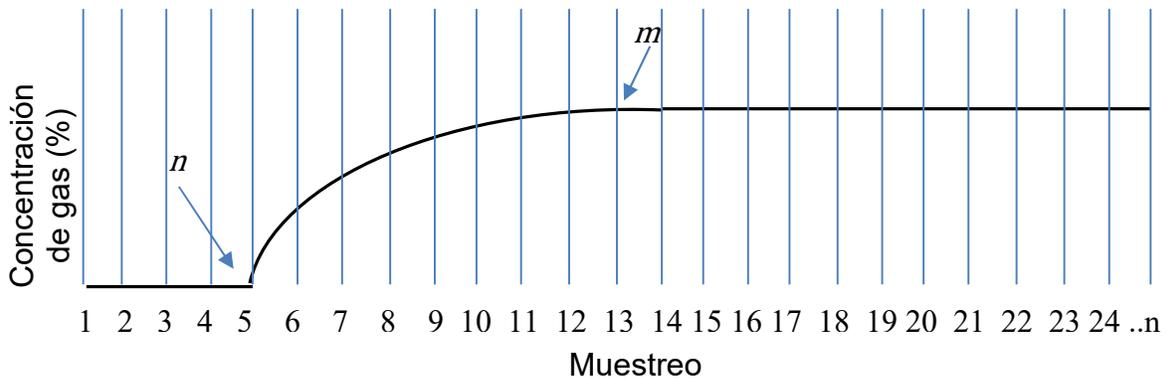


Figura 3.57 Concentraciones de un gas determinado en función muestreo

El algoritmo de programación del modo cerrado o de recirculación desarrollado con las bases anteriores se muestra en la Figura 3.58.

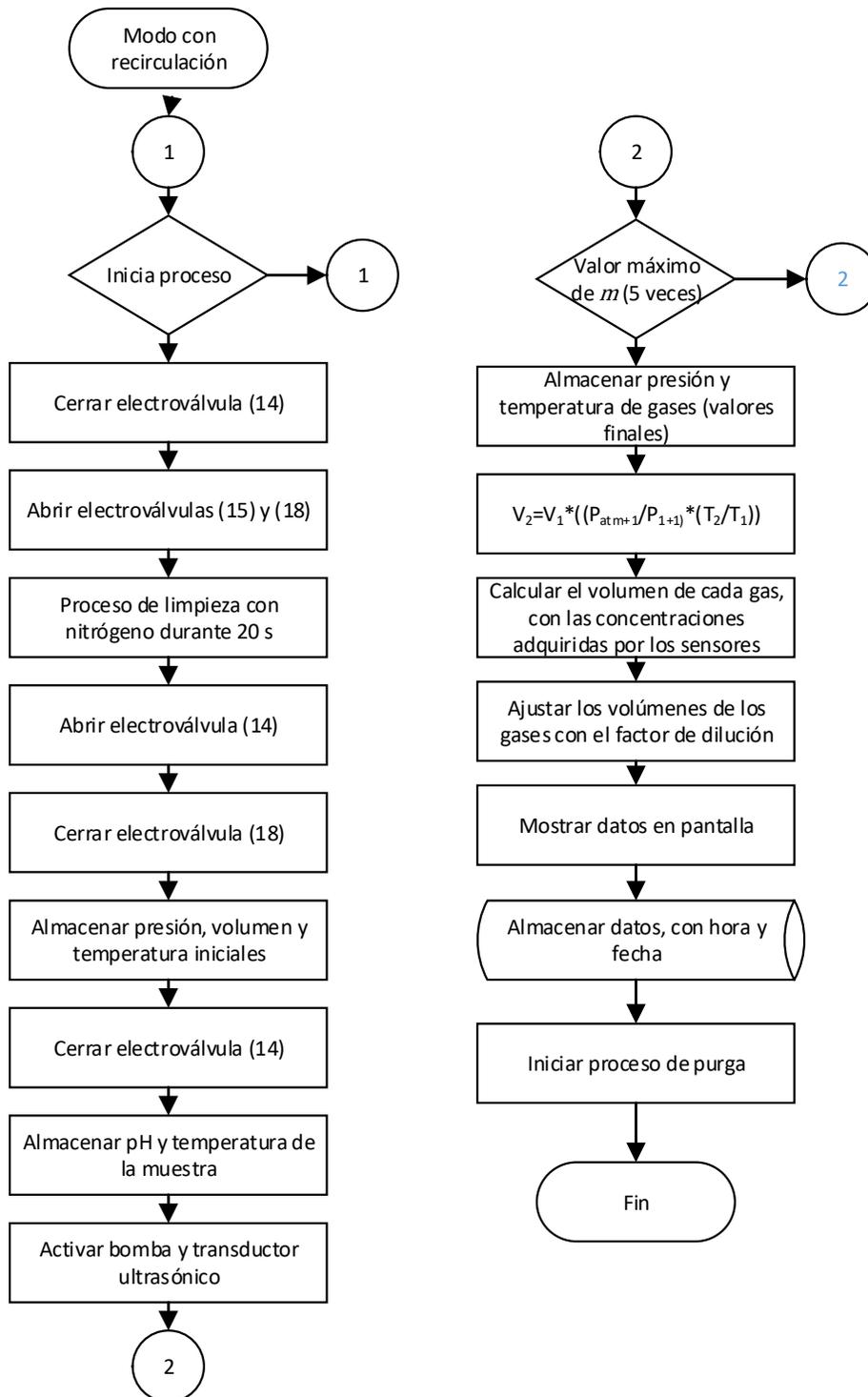


Figura 3.58 Algoritmo de programación en modo cerrado o de recirculación

3.10 INTEGRACIÓN DEL HARDWARE

Para la integración el hardware se adquirieron los materiales y se armó el sistema con el procedimiento que se describe a continuación:

1. Se tomaron las medidas internas del estuche tipo industrial para proceder a elaborar las placas de soporte y cubrimiento de los componentes, ver figura 3.59.



Figura 3.59 Fabricación de placas de aluminio

2. Se pintaron las placas con la pintura negra en aerosol, se ensamblaron los componentes tales como la pantalla de 7", el circuito ADC modelo ADS1115, modulo GPS y acondicionadores de señal en su interior con sus respectivas protecciones para interferencia electromagnética (EMI), la interconexiones fueron a través de cables con malla con blindaje según el tipo de comunicación que se requiere, se muestra entre cada módulo el tipo de comunicación (SDI, I2C, USART, etc.), se probaron con continuidad todo el cableado, entre componentes, pila de ion de litio y conectores, quedo pendiente la pintura conductiva a base de cobre para evita la EMI. En la figura 3.60 de muestra el diagrama a bloques del ensamblaje, quedando pendiente el módulo para la detección de gases y en figura 3.61 se muestra físicamente el ensamblaje, se dejo es espacio necesario para insertar en las siguientes etapas del proyecto el módulo de detección de gases con sus respectivos accesorios, como los son bomba de circulación, electroválvulas, mangueras, etc.

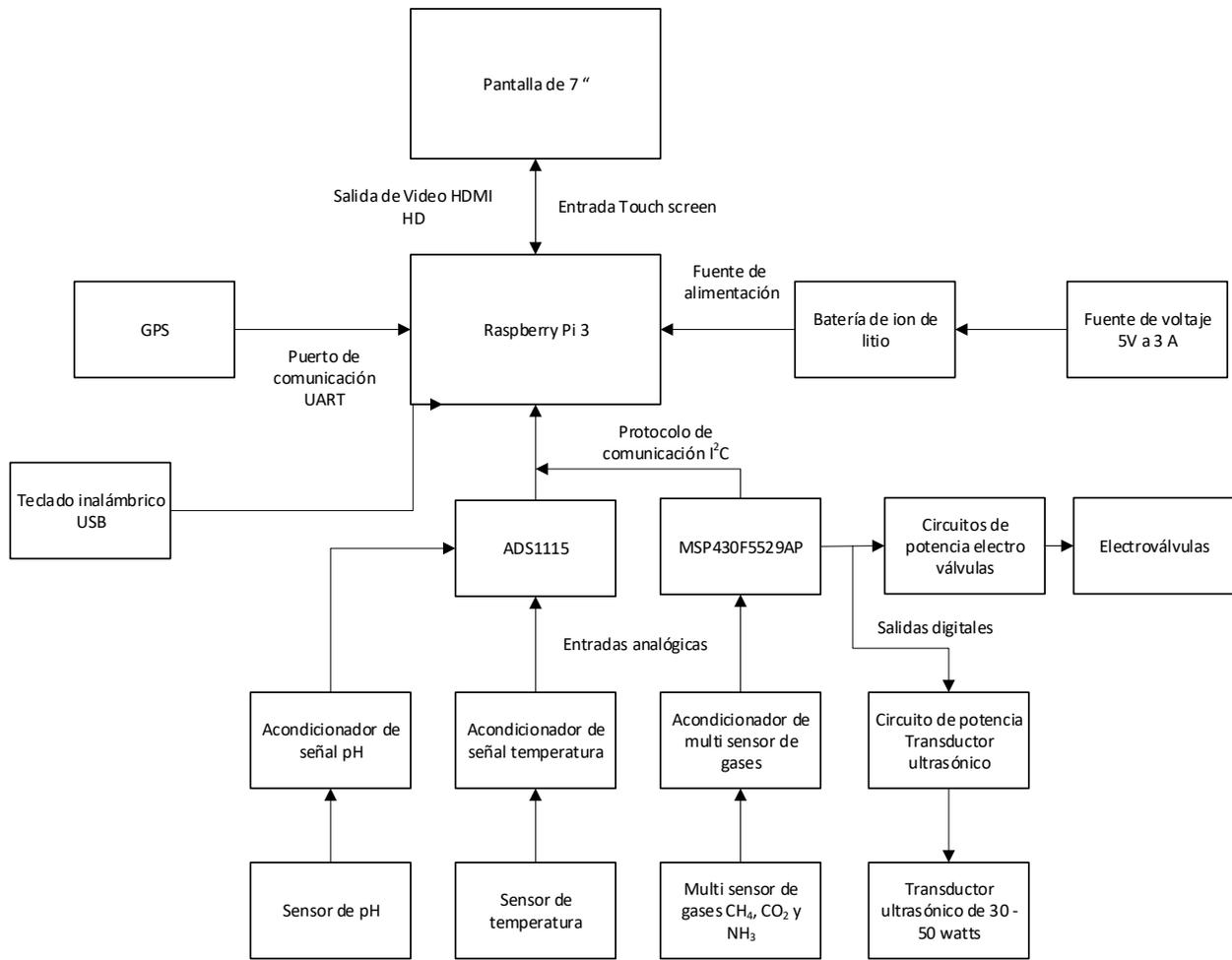


Figura 3.60 Diagrama a bloques del ensamblaje del hardware

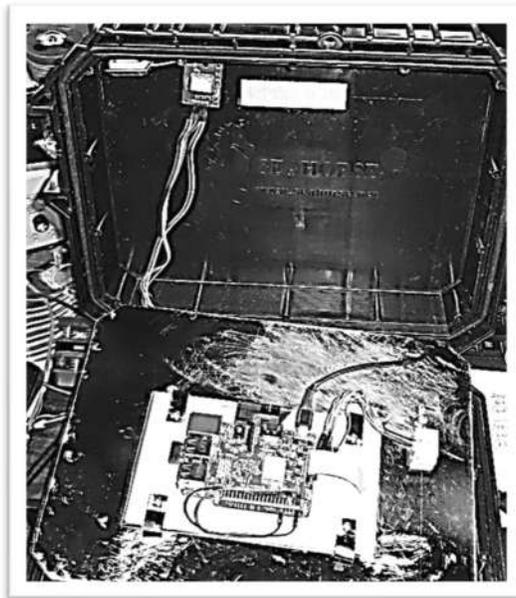


Figura 3.61 Integración de componentes en estuche industrial

El sistema ensamblado y probado quedo como se muestra en la figura 3.62



Figura 3.62 Sistema de procesamiento y adquisición de datos ensamblado

Se hicieron pruebas de la capacidad de operación del equipo con la pila teniendo una duración de operación continua promedio de 7.16 horas, ver tabla 3.19.

Tabla 3.19 Pruebas de rendimiento la batería de ion de litio

| | Fecha | Hora inicio carga máxima | Hora terminada Carga mínima | Duración |
|----------|------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|
| Prueba 1 | 15/11/2016 | 08:30:00 a. m. | 03:38:00 p. m. | 07:08:00 a. m. |
| Prueba 2 | 16/11/2016 | 08:45:00 a. m. | 04:06:00 p. m. | 07:21:00 a. m. |
| Prueba 3 | 17/11/2016 | 08:20:00 a. m. | 03:40:00 p. m. | 07:20:00 a. m. |
| | | | Promedio | 07:16:20 a. m. |

3.10.1 Desarrollo de software para medición y calibración de datos

Se descargaron las herramientas de programación necesarias y se procedió a estudiar la literatura ofrecida por Microsoft.

Los algoritmos desarrollados para calibración y operación para pH, temperatura y gases se tradujeron a C#, las interfaces gráficas están en proceso de programación con XAML.

El algoritmo principal del menú del sistema se muestra en la figura 3.63, donde se muestra el proceso parcial de medición del sistema, incluye el de medición de parámetros de pH, temperatura y gases, así como los independientes de calibración para cada uno de estos parámetros.

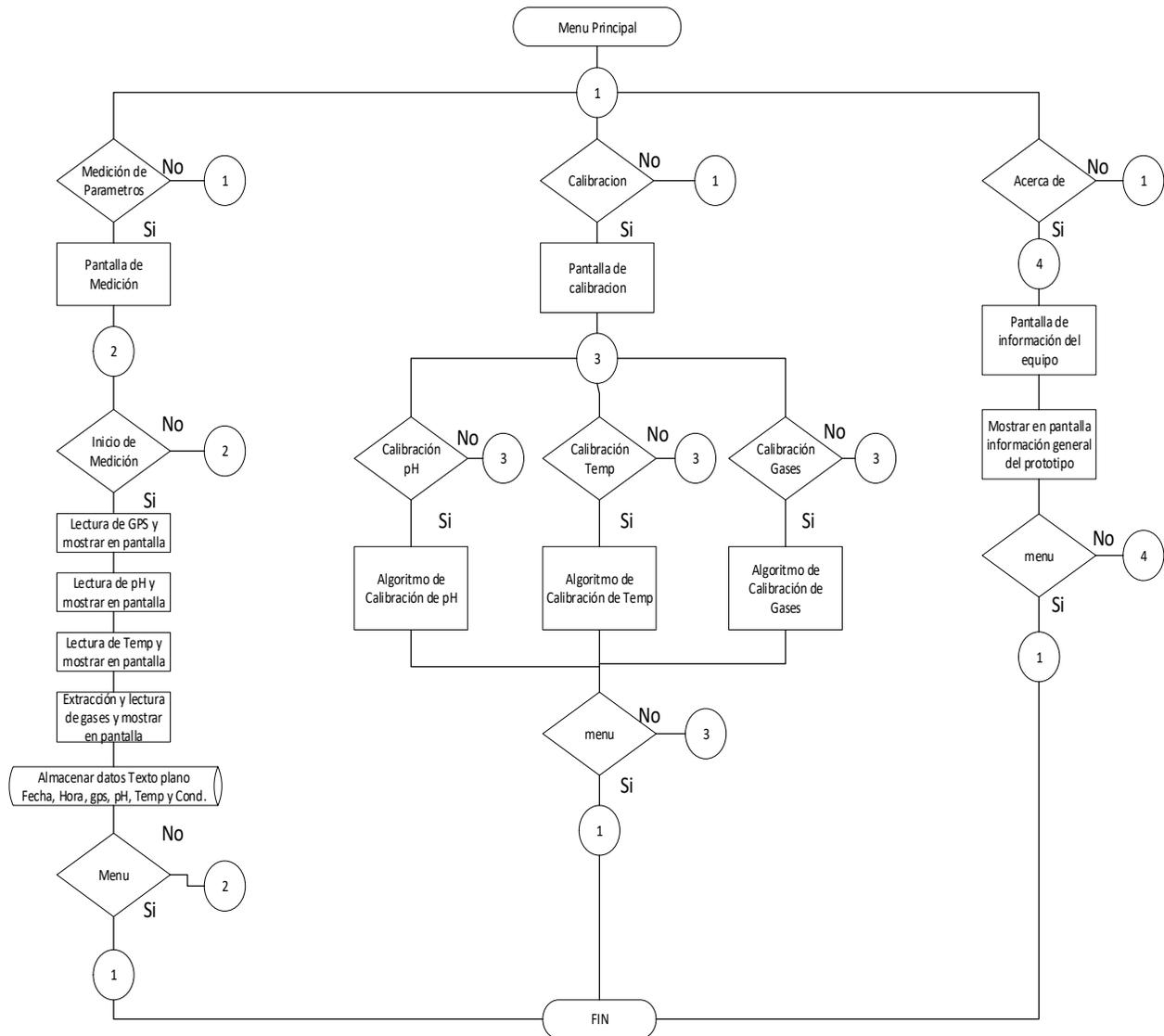


Figura 3.63 Diagrama de flujo del menú principal del sistema *in Site 100*

En la figura 3.64 se muestra el diseño del menú principal, donde se aprecia en la columna izquierda de color salmón en el primer elemento de arriba abajo es el icono donde se selecciona la descripción del menú y no solo de los iconos, el segundo elemento en un icono en forma de calculadora que indica el proceso de medición, el tercer elemento el icono con forma de llave española, indica la calibración de los sensores, el último elemento el icono con forma de signo de interrogación despliega la información del dispositivo.

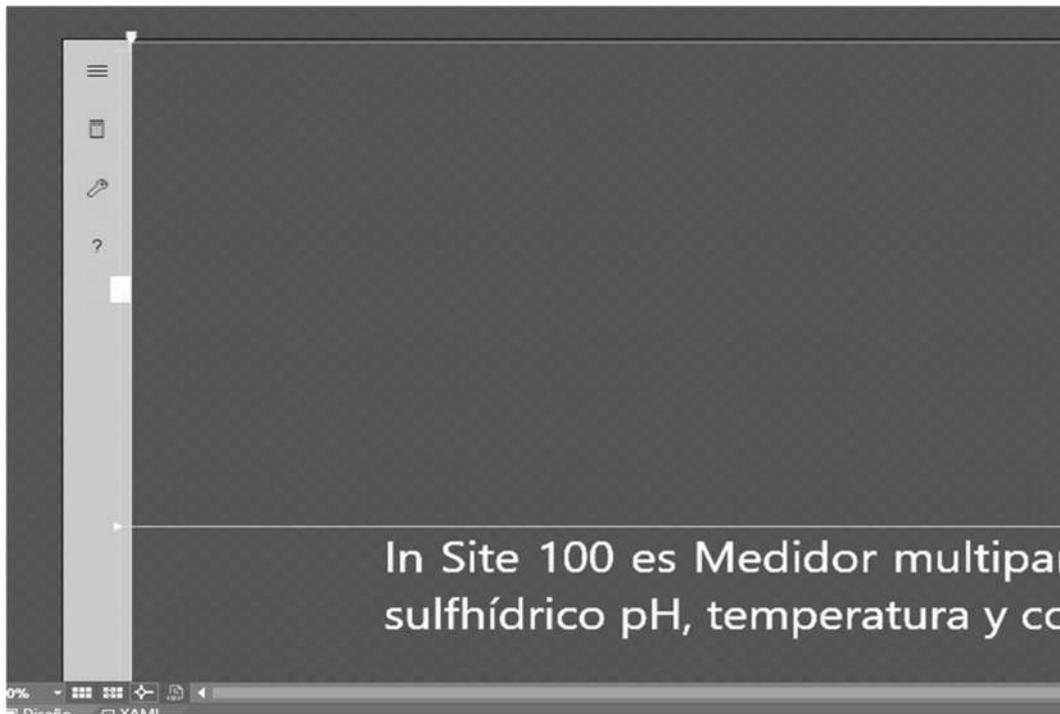


Figura 3.64 Diseño del menú del sistema para Windows Universal

En la figura 3.65 se muestra el diseño de la pantalla de medición del sistema donde se capturan los datos de gases, pH y temperatura, se muestra la fecha, la hora, el posicionamiento global, los parámetros se muestran en forma de texto y gráfica a través de simulación de medidores de aguja analógicos para darle más presentación al sistema de medición.

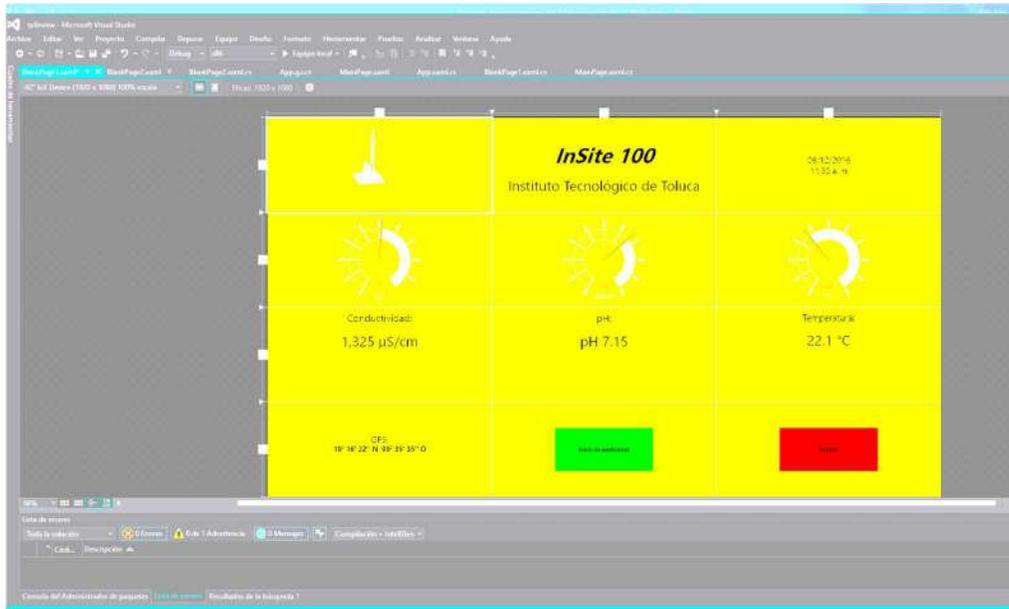


Figura 3.65 Diseño de la pantalla de medición

En la figura 3.66 se muestra el diseño de calibración, en la primera columna de izquierda a derecha se muestra la calibración del pH en los tres puntos, en la segunda columna la calibración de conductividad electrolítica con dos puntos y en la última columna la calibración del sensor de temperatura, cada uno de ellos corre su respectivo proceso según el algoritmo de programación.

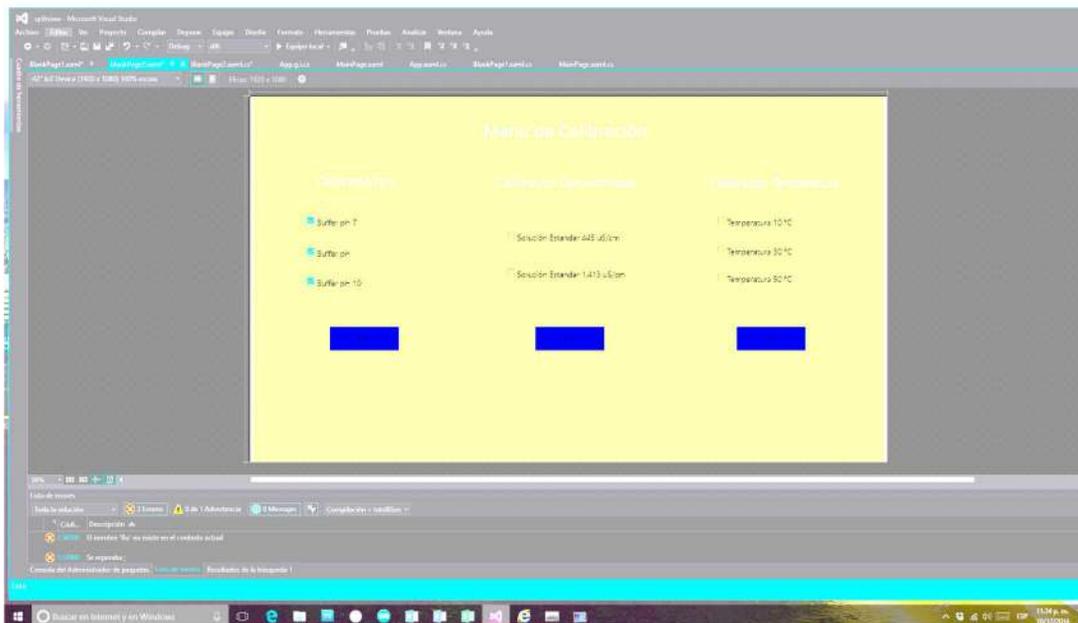


Figura 3.66 Diseño de la pantalla del menú de programación

Al momento de utilizar algunas librerías para mejorar la interface gráfica como son el uso de medidores analógicos generan errores al momento de interactuar el XAML con C#, se está investigando como corregirlos o se buscan otras herramientas Gráficas que sean sin costo o un costo bajo, las que hay disponibles son ofrecidas por terceros a un costo muy elevado.

3.11 VALIDACIÓN DE LA CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN DE LOS SENSORES

Se validaron los procesos de calibración y medición de los sensores con sus respectivos circuitos acondicionadores de señal y procesamiento de datos.

Para validar los procesos se repitieron los experimentos tres veces y se utilizaron patrones calibrados y en los anexos 2, 3 y 4, se muestran los certificados de calibración para los gases de calibración de CH₄ y CO₂, termómetros y buffers de pH respectivamente.

3.11.1 Pruebas y validación del multi sensor y primera etapa, con el algoritmo de Lambert-Beer

Con el circuito ya montado y energizado se hicieron pruebas en Excel aplicando el algoritmo y ecuación de Lambert-Beer ideal, teniendo los siguientes resultados:

Para calibrar CERO se tomaron 4 muestras y se sacaron los promedios, para utilizarlos como ACT_{Low} de cada gas y REF_{Low}, ver la Tabla 3.20.

Tabla 3.20 Valores para calibración CERO

| Calibración a baja concentración (CERO) | | | | | | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------|---------------------|
| Gas de calibración N ₂ =96%, O ₂ =4% y T=25°C | | | | | | |
| Detector | Muestra 1 promedio(mV) | Muestra 2 promedio(mV) | Muestra 3 promedio(mV) | Muestra 4 promedio (mV) | Promedio | Desviación estándar |
| ACT_{low} CO₂ | 74 | 74 | 72 | 74 | 73.5 | 1 |
| ACT_{low} CH₄ | 102 | 102 | 103 | 102 | 102.25 | 0.5 |
| ACT_{low} NH₃ | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 0 |
| REF_{low} Referencia | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 0 |

Para calibrar SPAN se tomaron 4 muestras y se sacaron los promedios, para utilizarlos como ACT_{CAL} de cada gas y REF_{CAL}, ver la Tabla 3.21.

Tabla 3.21 Valores para calibración SPAN

| Calibración a máxima concentración (SPAN) | | | | | | |
|---|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|---------------------|
| Gas de calibración CH ₄ =50%, CO ₂ =35%, N ₂ =15% y T=25°C | | | | | | |
| Detector | Muestra 1 promedio (mV) | Muestra 2 promedio(mV) | Muestra 3 promedio(mV) | Muestra 4 promedio(mV) | Promedio | Desviación estándar |
| ACT_{CAL} CO₂ | 30 | 30 | 32 | 30 | 30.5 | 1 |
| ACT_{CAL} CH₄ | 74 | 74 | 72 | 74 | 73.5 | 1 |
| ACT_{CAL} NH₃ | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 0 |
| REF_{CAL} Referencia | 56 | 56 | 55 | 56 | 55.75 | 0.5 |

Utilizando los valores promedio para CERO y SPAN se calcularon para cada gas los valores de CERO y b, utilizando las ecuaciones ideales de Lambert-Beer, por lo pronto se omitió para el NH₃ por falta de gas de calibración para él.

Para el CH₄:

$$CERO_{CH_4} = \frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \left(\frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \frac{REF_{CAL}}{ACT_{CAL}} \right)^{\frac{x_{LOW}}{x_{CAL} - x_{LOW}}} = 1.7042 \quad \text{Ec. 99}$$

$$b_{CH_4} = \left[\frac{\ln \left(\frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \frac{REF_{CAL}}{ACT_{CAL}} \right)}{x_{CAL} - x_{LOW}} \right] = 0.0073 \quad \text{Ec. 100}$$

Para el CO₂:

$$CERO_{CO_2} = \frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \left(\frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \frac{REF_{CAL}}{ACT_{CAL}} \right)^{\frac{x_{LOW}}{x_{CAL} - x_{LOW}}} = 1.2250 \quad \text{Ec. 101}$$

$$b_{CO_2} = \left[\frac{\ln \left(\frac{ACT_{LOW}}{REF_{LOW}} \times \frac{REF_{CAL}}{ACT_{CAL}} \right)}{x_{CAL} - x_{LOW}} \right] = 0.061 \quad \text{Ec. 102}$$

Ya con los parámetros de calibración, tanto para el CH₄ y el CO₂, se preparó una mezcla de gases para probar el sistema con las siguientes concentraciones, CH₄ al 25%, CO₂ al 17.5%, N₂ al 55.5% y O₂ al 2%. Se calculó la absorbancia y la concentración de cada gas con las lecturas del acondicionador de señal, utilizando las ecuaciones de Lambert-Beer:

$$Absorbancia = A = 1 - \frac{ACT}{REF \times CERO} \quad \text{Ec. 103}$$

$$Concentracion\ de\ gas = x = \frac{T}{T_{LOW}} \left[\frac{\ln \left(\frac{ACT}{REF \times CERO} \right)}{-b} \right] \quad \text{Ec. 104}$$

Se aplicó la fórmula para cada lectura de CH₄, CO₂, y Referencia, ver Tabla 3.22.

Tabla 3.22 Respuesta del sensor con gas de prueba para CH₄ y CO₂

| Mezcla de gases CH ₄ =25%, CO ₂ =17.5%, N ₂ =55.5%, O ₂ =2% y T=25°C | | | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|---------------------|------------------------|
| Detector | Muestra 1 promedio (mV) | Muestra 2 promedio (mV) | Muestra 3 promedio (mV) | Muestra 4 promedio (mV) | Promedio | Desviación estándar | Desviación típica (mV) |
| CH₄ | 47 | 46 | 46 | 46 | 46.25 | 1 | ±0.23 |
| CO₂ | 85 | 84 | 84 | 84 | 84.25 | 0.5 | ±0.22 |
| Referencia | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 0 | 0 |
| Lambert-Beer | | | | | | | |
| CH₄ | | | | | | | |
| Absorbancia | 0.1093 | 0.1198 | 0.1198 | 0.1198 | 11.72 | 0.00525 | ±0.0023 |
| Concentración | 22.55 | 24.85 | 24.85 | 24.85 | 24.28 | 1.15 | ±0.50 |
| CO₂ | | | | | | | |
| Absorbancia | 0.31 | 0.3294 | 0.3294 | 0.3294 | 0.3258 | 0.0097 | ±0.0042 |
| Concentración | 16.84 | 17.35 | 17.35 | 17.35 | 17.11 | 0.255 | ±0.11 |

Como se aprecia en la Tabla 3.6, los valores de la absorbancia y concentración tienen un error aproximado del 2%, lo cual es muy aceptable en comparación con otros equipos donde el error es de más del 3% (PCE, 2018). El experimento queda validado con los gases de calibración (ver anexo 2, certificado de calibración de gases).

CONCLUSIONES

Con base en el Estudio de Mercado, Estudio Económico, Estudio Técnico de Factibilidad y el diseño, se concluye que es factible el desarrollo del Dispositivo para la Evaluación *In Situ* de CH₄, CO₂, O₂, NH₃, pH y Temperatura en Sedimentos, a un bajo costo, preciso, portable, de fácil calibración, operación y de bajo consumo de energía.

El campo de aplicación, aunque en primera instancia se planeó solo para el análisis en sedimentos, dando seguimiento a algunas sugerencias de las encuestas, se amplió su aplicación a cuerpos de agua y pruebas atmosféricas; como, por ejemplo, elaboración de inventarios de GEI, mediciones de gases en rellenos sanitarios, monitoreo en la elaboración de composta, programas de remediación de cuerpos de agua, entre otros.

En la fase de diseño se seleccionaron los sensores de pH, temperatura, sensores de gases, los acondicionadores de señales, así como el sistema de adquisición de datos, todos estos de alta calidad, precisión y exactitud; acorde a los análisis en semisólidos, líquidos y gases.

La fabricación de la sonda fue acuerdo al estudio de mecánica de sedimentos y con acero 305 resistente a la corrosión.

Los sensores de gases IRND, son mucho más estables, precisos, exactos y tienen mucho mayor vida que los electroquímicos.

Tomando en cuenta el costo beneficio, la medición del H₂S quedo descartada por lo pronto por dos razones fundamentales, no pudo ser integrado al multisensor IRND por las interferencias con el CH₄ y el NH₃ y los sensores electroquímicos de gases, por los compuestos de que están fabricados requieren de manejo especial cuando termina su ciclo de vida, que es muy corto, menos de dos años.

Las características del equipo quedaron establecidas en base a el estudio de factibilidad, técnico y la experimentación: volumen de muestra de sedimentos hasta 194 mL, pH de 0 a 14 ± 0.01 , temperatura de -15 a $60^{\circ}\text{C} \pm 0.05$ °C, CH_4 de 0 a $20\% \text{ V/V} \pm 0.5\%$, de concentración, CO_2 de 0 a $20\% \text{ V/V} \pm 0.11\%$, de concentración, NH_3 de 0 a 25 ppm, O_2 de 0 a $25\% \text{ V/V} \pm 0.01\%$, de concentración.

Los productos de esta investigación son: Solicitud de patente del sistema de extracción de gases (anexo 5), dos publicaciones en dos revistas indexadas, con los artículos, "DEVELOPMENT OF A NOVEL NON-DISPERSIVE INFRARED MULTI SENSOR FOR MEASUREMENT OF GASES IN SEDIMENTS" y "MEDIDOR DE VOLUMEN DE GASES PARA BIORREACTORES" (anexos 6 y 7) y la participación en dos congresos (anexos 8 y 9).

REFERENCIAS

- Abarca, F. (2007). Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. *Perspectivas Sobre Conservación de Ecosistemas Acuáticos En México*, 113–144. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/533.pdf>
- AD, Analog Devices Inc. (2018). Zero Drift, Single-Supply, R/R, Input/Output Operational Amplifier. Recuperado de <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8629-EP.pdf>
- AD, Analog Devices Inc. (2018). NDIR Thermopile-Based Gas Sensing Circuit. Recuperado de <http://www.analog.com/en/design-center/reference-designs/hardware-reference-design/circuits-from-the-lab/CN0338.html#rd-overview>
- Alphasense, Inc. (2018) Application Notes. <http://www.alphasense.com/index.php/air/application-notes/>
- Benassini, M. (2009). Introducción a la Investigación de Mercados: Enfoque para América Latina. Segunda edición, México, D.F, Pearson Educación.
- Brown, L., Lemay, E., Bursten, B., Murphy, C., Woodward, P. (2014). *Química, La Ciencia Central*. Ciudad de México, México: Pearson Educación:
- Butker, M., Yamazoe, N., Vanysek, P. Aizawa, M. (1999). Chemical Sensors. Ed. The Electrochemical Society Inc.
- Castañeda, J., Carranza, J. (2015). El concepto de ancho de banda en espectrofotómetros de barrido y una propuesta en su determinación experimental. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Recuperado

de <https://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/simposio%202002/doctos/te015.pdf>

Chang, R. (1999). *Química*. Distrito Federal, México: McGraw-Hill

Chassaing, R. y Reay, D. (2011). *Digital Signal Processing and Applications with the TMS320C6713 and TMS320C6416 DSK*, Nueva York: John Wiley & Sons.

Chung, C. (2011). An Autocalibrated All-Digital Temperature Sensor for On-Chip Thermal Monitoring. *IEEE Circuits and Systems II: Express Briefs*, 58(2). 105-109

Comisión Nacional del Agua (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. D.F. México: Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/PNH2014-2018.pdf> [Consulta: 15 de mayo de 2016]

CO2Meter. (2018). *500ml/minute 1,000 hour Micro Gas Pump*. Recuperado de <http://www.co2meters.com/Documentation/Datasheets/DS-PMP-0010.pdf>

CO2METER. (2018). *UV Flux 25% Oxigen Sensor*. Recuperado de <http://www.co2meters.com/Documentation/Datasheets/DS-OX-0052-Oxygen-Sensor.pdf>

Creus, Antonio. (2011). *Instrumentación industrial*. Distrito Federal, México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Department Of Health And Human Services. (2007). *NIOSH Pocket Guide to chemical hazards* (2005-149).

Diario Oficial de la Federación. (1989). *Norma CE-CCA-001/89. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua* (DOF-12-1989).

Di Paolo, M. (2013). *Data Acquisition Systems from Fundamentals to Applied Design*. New York, New York, USA: Springer.

Environmental Protection Agency. (2004). *The Incidence and Severity of Sediment Contamination in Surface Waters of the United States, National Sediment Quality Survey: Second Edition*. Washington, D.C.

EOC, ELECTRO OPTICAL COMPONENTS. (2018). Micro-Hybrid Pulsable & High Power IR Source. Recuperado de: http://www.eoc-inc.com/infrared_source.htm

Farahi, R.H.; Passian, A.; Tetard, L.; Thundat, T. (2012), Critical issues in sensor science to aid food and water safety. *ACS Nano* 2012, 6, 4548 - 4556

Eiali, T. (2003). *Discrete Systems and Digital Signal Processing with MATLAB*, Ney York: CRC Press.

Granada, M. y Mediavilla, E. (2009). *Instrumentación Electrónica: Transductores y Acondicionadores de Señal*. Santander, España: Universidad de Cantabria.

G-SCIENCE. (2012). *Improving Knowledge of Emissions and Sinks of Greenhouse Gases*. Recuperado de <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-s3.pdf>

Hanna Instruments, Inc. (2018). *HI 99121 Soil pH Test Kit*. Recuperado de <http://shop.hannainst.com/hi99121-ph-meter-for-direct-soil-measurement.html#spec> [Consulta: 21 de mayo de 2018].

Halogen, A. (2010). *Development and Use of Optical Sensors in Modern Analytical Chemistry* (Tesis de Doctorado). University of Gothenburg.Irlanda.

Health and Safety Executive. (2011). *EH40/2005 Workplace exposure Limits*. Washington, USA: HSEbooks.

Herrick, E. y Jones, T. (2002). A DYNAMIC CONE PENETROMETER FOR MEASURING SOIL PENETRATION RESISTANCE. *Soil Science Society of America Journal* 2005, 66,4, 1320-1324.

Hielscher, Ultrasound Technology. (2018). Desgasificación ultrasónica y antiespumantes de líquidos. Recuperado de https://www.hielscher.com/es/degassing_01.htm

Hodgkinson, J., Smith, R., Shaffell, J., y Tatam, R. (2013). Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 μ m in a compact and optically efficient sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 186, 580-588.

ILT, International Light Technologies, Inc. (2017). Miniature Visible-IR Lamps T-3/4 & T-1 (NDIR Lamps). Recuperado de: <https://www.intl-lighttech.com/products/light-sources/lamps/miniature-visible-and-ir/t-3-4-t-1>

INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2013). *Inventario de gases y compuestos de efecto invernadero*. Recuperado de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015_inv_nal_emis_gei_result.pdf

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *PIB y Cuentas Nacionales de Mexico*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/ee/> [Consulta: 21 de mayo de 2018].

Landtec North America. (2015). *Gem 5000 Portable Gas Analyzer Instrumentation*. Recuperado de http://www.landtecna.com/wp-content/uploads/2015/04/Landtec_GEM5000_cutsheet_2015_REDUCED.pdf [Consulta: 22 de mayo de 2016].

Landtec North America. (2001). GEM™ 2000, Gas Analyzer & Extraction Monitor Operation Manual. Recuperado de <http://www.ierents.com/Manuals/Gem-2000.pdf> [Consulta: 10 de abril de 2016].

Manahan, Stanley. (2006). *Introducción a la Química Ambiental*. D.F. México: Reverté S.A.

Micro-Hybrid. (2011). Four Channel Thermopile Detector, TS4x200B-A-S1.5. Recuperado de https://finder.micro-hybrid.de/fileadmin/Datenblaetter_und_andere_technische_Dokumente/Thermopiles/MH_TS4x200B-A-S1.5.pdf

Neira, M. (2010). Fundamentos de espectrofotometría. Plataforma de Apoyo a la Docencia Presencial. Recuperado de: https://www.u-cursos.cl/odontologia/2010/2/OD0903/1/material_docente/

Microsoft (2016). *Learn about Windows IoT Core*. Recuperado de <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/iot/Explore/IoTCore> [Consulta: 15 de octubre de 2016].

Microsoft (2016). *MSDN Library, Herramientas y lenguajes de desarrollo C#*. Recuperado de <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/kx37x362.aspx> [Consulta: 15 de octubre de 2016].

Mid-America Regional Council. (2014) *¿Qué es la contaminación por sedimentos?*, (Environment Water Resources). Universidad Nacional de Educación a Distancia

Milosavljevic V. (2013) Non-Dispersive Infrared (NDIR) gas sensors. Recuperado de <http://www.electronics-base.com/general-description/gas-sensors/non-dispersive-infrared-ndir-gas-sensors> [Consulta: 25 de septiembre de 2016]

Muelas A. (2010). Manual de mecánica del suelo y cimentaciones. Recuperado de

[http://www.uned.es/dpto-icf/mecanica_del_suelo_y_cimentaciones/](http://www.uned.es/dpto-icf/mecanica_del_suelo_y_cimentaciones/images/mecansueloycimentacionescap_1.pdf) images/
mecansueloycimentacionescap_1.pdf

North American Commission for Environmental Cooperation. (2012). *Manual de métodos de muestreo y preservación de muestras de las sustancias prioritarias para las matrices prioritarias del PRONAME*. Laboratorios ABC, Mexico.

NIST. (2018). *Carbon dioxide*. National Institute of Standards and Technology. Recuperado de: <https://www.nist.gov/>

Pallas, R. (2005). *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Madrid, España: Marcombo.

Parajuli, P. (2011). *Biogas measurement techniques and the associated errors*. University of Jyväskylä, Finland.

Parnis, J. y Oldham, K. (2013). Beyond the Beer–Lambert law: The dependence of absorbance on time in photochemistry. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2013.06.006

PCE Ibérica S.L. (2016) “Catalogo Medidores de Gas” pp. 45-49. Recuperado de <http://www.pce-iberica.es/software/english-catalogue-pce.pdf>

Proakis, Jhon G, y Manolakis Dimitris G. (2007). *Tratamiento digital de Señales*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall.

RASPBERRY PI FOUNDATION (2016), *Raspberry Pi 3 Model 3*, Recuperado de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

Schlumberger, Inc. (2018). Gas Separation for ESP Operations. Recuperado de: http://www.slb.com/services/production/artificial_lift/submersible/esp_components/esp_gas_separator.aspx

SEMARNAT, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 – 2010*. D.F. México: SEMARNAT

SEMARNAT, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). *Teoría y conceptos generales para elaborar inventarios verificables de emisiones de gases de efecto invernadero*. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/fomento/documentos/2014/guia-inventaros-gei.pdf>

Salazar, J. Peñuela, G. (2010). *Toma de muestras en aguas, suelos, sedimentos y superficies sólidas*. Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia.

Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (1995). Norma Mexicana NMX-AA-112-1995-SCFI. *Análisis De Agua Y Sedimentos – Evaluación De Toxicidad Aguda Con Photobacterium Phosphoreum – Método De Prueba*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-112-1995.pdf>

Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2000). Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. *Análisis De Agua - Determinación De La Conductividad Electrolítica - Método De Prueba*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2000). *Norma Mexicana NMX-AA-021-SEMARNAT-2000. Especificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/documents/html>

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Compendio de estadísticas ambientales. México*. Recuperado de www.semarnat.gob.mx.

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambiental. Indicadores clave y de desempeño ambiental. Capítulo 7*. Recuperado de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/07_residuos/cap7_1.html

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 – 2010*. D.F. México: SEMARNAT

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). *Teoría y conceptos generales para elaborar inventarios verificables de emisiones de gases de efecto invernadero*. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/fomento/documentos/2014/guia-inventaros-gei.pdf>

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). *Elementos mínimos para la elaboración de los programas de cambio climático de las entidades federativas*, (1), 1–5. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Swinehart, D. (1962). The Lambert-Beer Law. *J. Chem. Educ.*, 39 (7), p 333. DOI: 10.1021/ed039p333

Swift, R.S. (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 166, 858-871.

Testo, S.A. (2018). *Testo 206-pH2, medidor de pH*. Recuperado de https://www.testo.es/detalles_producto/0563+2062/testo-206-pH2-Medidor-de-pH

TI, Texas Instruments Inc. (2018). Ultra-Small Low-Power, 16-bit Analog to Digital Converter with internal Reference. Recuperado de <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ads1115.html>

TI, Texas Instruments Inc. (2013). NDIR CO₂ Gas Detection System. Recuperado de www.ti.com/lit/an/snaa207/snaa207.pdf

Thermo Scientific, Inc. (2010). Thermo Scientific TRACE GC Ultra Gas Chromatograph Operating Manual. Recuperado de https://www.testo.es/detalles_producto/0563+2062/testo-206-pH2-Medidor-de-pH

United States Geological Survey. (2003). Tabla de Clasificación de sedimentos. Recuperado de <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-001/html/docs/images/chart.pdf>

Tippens, P. (2011). *Física, Conceptos y Aplicaciones*, 7ma Edición, McGraw-Hill Interamericana Editores

Torres, P. y Pérez, A. (2010). *Actividad Metanogénica Específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, 9, 5-14.

Vaquerano-Pineda, N; Salazar-Rojas, T; Porrás-Acosta, M. (2016). *Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento*. Tecnología en Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág. 86-96.

Winsense Co., LTD. (2018). Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) Product datasheet. Recuperado de http://winsense.co.th/item/item_image/winsense_isfet_ph_sensor_wips_datasheet.pdf

Wong, J. (2013). Non-Dispersive Infrared (NDIR) Gas Measurement: Past, Present & Future. Airware Inc., Goleta, CA. Recuperado de http://www.iaaria.org/conferences2013/filesSENSORDEVICES13/Jacob_SensorDevices_2013_Keynote.pdf

Yurkanis, P. (2008). Espectrometría de masas, es

pectroscopía infrarroja y espectroscopía ultravioleta/visible. Química Orgánica (pp.529-532). México: Pearson Educación.

Anexo 1

Encuesta a Investigadores

Equipo de Medición *in situ* de CH₄, CO₂, O₂ disuelto, NH₃, H₂S, pH, conductividad y temperatura en sedimentos en cuerpos de agua (lagunas ríos, humedales, etc.)

Aplicaciones:

- Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en cuerpos de agua como humedales, lagunas, ríos, presas, etc.)
- Estudios de afectación en cuerpos de agua
- Monitoreo en programas de remediación de cuerpos de agua
- Monitoreo en el proceso de producción de composta

Especificaciones:

| | |
|-------------------------|--|
| O ₂ Disuelto | 0 – 50 mg/L (ppm); 0 – 600 % de saturación |
| CH ₄ | 0 – 100% |
| CO ₂ | 0 -100% |
| NH ₃ | 0 - 1000 ppm |
| H ₂ S | 0 - 200 ppm |
| pH | 0 – 14 pH |
| Conductividad | 0.1 μS – 0.01 mS |
| Temperatura | -25° - 120°C |

Precisión:

| | |
|-------------------------|-----------|
| O ₂ Disuelto | ± 1.5% |
| CH ₄ | ± 1.5% |
| CO ₂ | ± 1% |
| NH ₃ | ± 5 ppm |
| H ₂ S | ± 1 ppm |
| pH | ± 0.02 pH |
| Conductividad | ± 1.5% |
| Temperatura | ± 1 °C |

Fecha y lugar: _____

Nombre: _____

Institución o Empresa: _____

Cargo: _Profesor Investigador_____

1.- ¿Conoce un equipo en el mercado que tenga todos estos parámetros de medición en el mismo equipo?

2.- ¿Considera útil un equipo con estas capacidades de medición?

3.- ¿Adquiriría un equipo con estas funciones?

4.- ¿Quitaría o pondría más parámetros de medición? ¿Cuáles?

5.- Comentarios:

Anexo 2



INFORME DE RESULTADOS

| | | | |
|---------------|------------------------|--------------------|----------------|
| Razón Social: | PROVILAB, S.A. DE C.V. | Fecha de emisión : | 2017-05-05 |
| Dirección: | Toluca, Edo. México | Planta de llenado: | Barrientos |
| | | No. de folio: | 17-2981 |

MEZCLA PRIMARIA

| Componentes (mensurando) | Concentración ¹ | Incertidumbre expandida ² (U, k=2) |
|---------------------------------------|----------------------------|---|
| Dióxido de Carbono (CO ₂) | 35.00 cmol/mol | ± 1.0 % |
| Metano (CH ₄) | 50.02 cmol/mol | ± 1.0 % |
| Nitrógeno (N ₂) | Balance | ----- |

Datos Generales del Producto

| | |
|-------------------------|---------------------|
| Tipo de cilindro: | 7- AL |
| No. Serie del cilindro: | FF46561 |
| No. de Lote: | 040520170606 |
| Capacidad del Cilindro: | 0.85 m ³ |
| Válvula CGA: | 350 |
| Caducidad*: | 24 Meses |
| Presión: | 1460 psi a 21°C |

Trazabilidad a marco de pesas tipo S del Centro Nacional de Metrología (CENAM), serie 15402540, bajo informe de calibración msp-ICT 0380/2016

¹Aplica a partir de la fecha de llenado del producto indicado en el número de lote

² El valor de incertidumbre se basa en la Norma NMX-CH-140-IMNC-2002, considerando un factor de cobertura K=2 a un nivel de confianza de 95.45 %

Esta garantía no podrá ser reproducida en forma total o parcial sin la autorización previa del Laboratorio de Control de Calidad de INFRA S.A. de C.V. Planta Barrientos. La garantía de calidad es válida para el (los) producto(s) descrito (s) en la misma. Es responsabilidad del usuario el uso adecuado de la información aquí descrita.

AUTORIZÓ

Ing. Astrid Ciles Campos
Laboratorio de Control de Calidad

INFRA S.A. DE C.V.
Félix Guzmán No. 16, Col. El Parque, Naucalpan, Edo. de México, C.P. 53398
5329-3000
ventas@infra.com.mx
www.infra.com.mx



Anexo 3



entidad mexicana
de acreditación a.c.



Número de acreditación N° T-29. Vigencia de acreditación a partir de 2008-05-14 con vencimiento 2012-05-14.

Acreditación otorgada bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 ISO/IEC 17025:2005

INFORME DE CALIBRACION
AREA DE TEMPERATURA
CALIBRACION DE TERMOMETROS DE LIQUIDO EN VIDRIO

Orden : 2317/2010 Fecha de Calibración : 2010-10-07 Informe No.: 6110/2010 Hoja 1 de 1
Fecha de Recepcion : 2010-10-06 Fecha de Emisión : 2010-10-07
Cliente : INSTITUTO TECNOLOGICO DE TOLUCA
Dirección : AV. TECNOLOGICO S/N, COL. EX RANCHO LA VIRGEN METEPEC, EDO. DE MEXICO, C.P. 52140.

| | |
|---|--|
| Inst. Calibrado : TERMOMETRO DE LIQUIDO EN VIDRIO Marca : ERTCO Modelo : ASTM 90C No de Serie : 6717 Alcance : 0 A 30 °C Identificación : TE-9 E.M.T. ± 0,1 °C | Inst. Patron : TERMOMETRO DE RESISTENCIA Marca : TECHNE Modelo : PT 100 No. de Serie: 121709-7 Ident.: CAL-TR-14/16 Alcance : -38 A 419,5 °C Incertidumbre: ± 0,11 K Ultima Calibración 2010-02-26 Calibrado por : SIMCA Inf. de Cal.: 517/2010 Trazable a : CENAM |
|---|--|

| Temp. nominal °C | Lecturas del instrumento Patrón °C | Lecturas del instrumento bajo prueba °C | Error °C | ± U °C |
|------------------|------------------------------------|---|----------|--------|
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 |
| 10,00 | 9,99 | 10,03 | 0,04 | 0,13 |
| 20,00 | 20,00 | 20,05 | 0,05 | 0,13 |
| 30,00 | 30,01 | 29,99 | -0,02 | 0,13 |

Observaciones: SERVICIO EN PLANTA. INSTRUMENTO CORREGIDO POR COLUMNA EMERGENTE, TERMOMETRO DE INMERSION PARCIAL.

E.M. = 0,05 °C

E.M. = Error máximo encontrado durante la calibración.

E.M.T. = Error Maximo tolerado

U = Incertidumbre expandida utilizando un factor de cobertura k=2; y un nivel de confianza del 95,45 %

Es responsabilidad del usuario realizar las correcciones pertinentes al momento de hacer sus mediciones.



El presente informe no puede ser modificado ni alterado sin la autorización del laboratorio de calibración de Simca Grupo Industrial S.A. de C.V.
CAJEROS No. 45 COL. EL SIFON C.P. 09400 MEXICO, D.F. CONMUTADOR 5633-7331 FAX EXT. 301 e-mail: ventas@simca.com.mx



entidad mexicana
de acreditación s.c.



Número de acreditación N° T-29. Vigencia de acreditación a partir de 2008-05-14
con vencimiento 2012-05-14.

Acreditación otorgada bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 ISO/IEC 17025:2005

INFORME DE CALIBRACION AREA DE TEMPERATURA CALIBRACION DE TERMOMETROS DE LIQUIDO EN VIDRIO

Orden : 2317/2010 Fecha de Calibración : 2010-10-07 Informe No.: 6109/2010 Hoja 1 de 1
Fecha de Recepción : 2010-10-06 Fecha de Emisión : 2010-10-07
Cliente : INSTITUTO TECNOLOGICO DE TOLUCA
Dirección : AV. TECNOLOGICO S/N, COL. EX RANCHO LA VIRGEN METEPEC, EDO. DE MEXICO, C.P. 52140.

| | |
|--|---|
| <p>Inst. Calibrado : TERMOMETRO DE LIQUIDO EN VIDRIO Marca : KESSLER Modelo : ASTM91C-86 No de Serie : 509800 Alcance : 20 A 50 °C Identificación : TE-5 E.M.T. ± 0,1 °C</p> | <p>Inst. Patron : TERMOMETRO DE RESISTENCIA Marca : TECHNE Modelo : PT 100 No. de Serie: 121709-7 Ident.: CAL-TR-14/16 Alcance : -38 A 419,5 °C Incertidumbre: ± 0,11 K Ultima Calibración 2010-02-26 Calibrado por : SIMCA Inf. de Cal.: 517/2010 Trazable a : CENAM</p> |
|--|---|

| Temp. nominal °C | Lecturas del instrumento Patrón °C | Lecturas del instrumento bajo prueba °C | Error °C | ± U °C |
|------------------|------------------------------------|---|----------|--------|
| 20,00 | 20,00 | 20,00 | 0,00 | 0,13 |
| 30,00 | 30,01 | 30,01 | 0,00 | 0,13 |
| 40,00 | 40,00 | 40,00 | 0,00 | 0,13 |
| 50,00 | 50,01 | 50,00 | -0,01 | 0,13 |

Observaciones: SERVICIO EN PLANTA. INSTRUMENTO CORREGIDO POR COLUMNA EMERGENTE, TERMOMETRO DE INMERSION PARCIAL.

E.M. = -0,01 °C

E.M. = Error máximo encontrado durante la calibración.

E.M.T. = Error Maximo tolerado

U= Incertidumbre expandida utilizando un factor de cobertura k=2; y un nivel de confianza del 95,45 %

Es responsabilidad del usuario realizar las correcciones pertinentes al momento de hacer sus mediciones.



El presente informe no puede ser modificado ni alterado sin la autorización del laboratorio de calibración de Simca Grupo Industrial S.A de C.V.
 CAJEROS N° 45 COL. EL SIFON C.P. 09400 MEXICO, D.F. CONMUTADOR 5633-7331 FAX EXT. 301 e-mail: ventas@simca.com.mx

Anexo 4

Soluciones patrón de pH y soluciones standard de conductividad

SOLUCIONES PATRÓN DE PH

| Nombre | Descripción | Cantidad | Ref. |
|--|-------------|----------|---------|
| Patrones de pH certificados de acuerdo con IUPAC | | | |
| Se suministran en caja hermética sellada; sin abrir, tienen una duración de conservación garantizada de 4 años; con certificado DKD; trazables a materiales de referencia estándar NIST; precisión $\pm 0,010$ pH (25°C) | | | |
| pH 1,679 | | 500 ml | S11M001 |
| pH 4,005 | | 500 ml | S11M002 |
| pH 7,000 | | 500 ml | S11M004 |
| pH 10,012 | | 500 ml | S11M007 |

Soluciones patrón buffer

Listas para el análisis; con y sin identificación por colores *

| pH | Color | Cantidad | Ref. |
|----------|---------------------------------------|----------|---------|
| pH 4,01 | Rojo | 500 ml | 2283449 |
| pH 7,00 | Amarillo | 500 ml | 2283549 |
| pH 10,01 | Azul | 500 ml | 2283649 |
| pH 4,01 | Incolora | 500 ml | 1222349 |
| pH 7,00 | Incolora | 500 ml | 1222249 |
| pH 10,00 | Incolora | 500 ml | 1222149 |
| pH 1,09 | Calidad técnica, conforme a DIN 19267 | 500 ml | S11M009 |
| pH 4,65 | Calidad técnica, conforme a DIN 19267 | 500 ml | S11M010 |
| pH 9,23 | Calidad técnica, conforme a DIN 19367 | 500 ml | S11M011 |

Sobres de patrón buffer de pH en polvo

Envasados individualmente, para 50 ml de solución nueva; con y sin identificación por colores *

| pH | Color | Cantidad | Ref. |
|----------|----------|----------|---------|
| pH 4,01 | Rojo | 50/pack | 2226966 |
| | | 250/pack | 2226964 |
| pH 7,00 | Amarillo | 50/pack | 2227066 |
| | | 250/pack | 2227064 |
| pH 10,00 | Azul | 50/pack | 2227166 |
| | | 250/pack | 2227164 |

Soluciones patrón buffer SINGLET

En bolsas individuales, herméticas, selladas, de 25 ml, identificadas por colores

| pH | Color | Cantidad | Ref. |
|----------------------|-----------------|------------|---------|
| pH 7,00 and pH 10,01 | Amarillo + azul | 2x 10/pack | 2769820 |
| pH 4,01 and pH 7,00 | Rojo + amarillo | 2x 10/pack | 2769920 |
| pH 4,01 | Rojo | 20/pack | 2770020 |
| pH 7,00 | Amarillo | 20/pack | 2770120 |
| pH 10,01 | Azul | 20/pack | 2770220 |

SOLUCIONES STANDARD DE CONDUCTIVIDAD

| Nombre | Descripción | Cantidad | Ref. |
|---|-------------|----------|------|
| Standards con certificado | | | |
| Se suministran en caja hermética sellada; duración de conservación garantizada; con certificado; trazables a materiales de referencia estándar NIST | | | |

| | | | |
|------------|------------------------------|--------|---------|
| KCl 1 D | 111,3 mS/cm $\pm 0,5\%$ | 500 ml | S51M001 |
| KCl 0,1 D | 12,85 mS/cm $\pm 0,35\%$ | 500 ml | S51M002 |
| KCl 0,01 D | 1.408 μ S/cm $\pm 0,5\%$ | 500 ml | S51M003 |
| NaCl 0,05% | 1.015 μ S/cm $\pm 0,5\%$ | 500 ml | S51M004 |

Soluciones de NaCl

| | | | |
|---------------------|----------------------------|--------|---------|
| 85,47 mg/l as NaCl | 180 ± 10 μ S/cm | 100 ml | 2307542 |
| 491 mg/l as NaCl | 1.000 ± 10 μ S/cm | 100 ml | 1440042 |
| 1.000 mg/l as NaCl | 1.990 ± 20 μ S/cm | 100 ml | 210542 |
| 10.246 mg/l as NaCl | 18.000 ± 50 μ S/cm | 100 ml | 2307442 |

Soluciones molares de KCl

| | | | |
|-------------|------------------|--------|---------|
| KS910 | 12,88 mS/cm | 500 ml | C20C250 |
| KCl 0,1 M | | | |
| KS920 | 1,413 mS/cm | 500 ml | C20C270 |
| KCl 0,01 M | | | |
| KS930 | 146,9 μ S/cm | 500 ml | C20C280 |
| KCl 0,001 M | | | |

* Patrón trazable según materiales de referencia estándar NIST; precisión $\pm 0,02$ pH (25°C); concentraciones adicionales, bajo solicitud.



Formulados de acuerdo con los requisitos de IUPAC: Standards certificados para pH y conductividad.

DOC-062-01 2008-08-07



UNITED FOR WATER QUALITY

Anexo 5

1

EXTRACTOR DE GASES ACELERADO

SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
CONSEJO NACIONAL DE TECNOLOGÍA NACIONAL DE MÉXICO

27 NOV 2013

DESCRIPCIÓN

RECIBIDO
DIRECCIÓN DE VINCULACIÓN
INTERCAMBIO ACADÉMICO

OBJETO DE LA INVENCION

- 5 Extraer gases disueltos de muestras semisólidas y líquidas para su análisis *in situ*.

2011
Elaboración redacción
conforme a
que IAPI

RESUMEN

10 El Extractor de Gases para sedimentos y líquidos por ultrasonido opera con un tiempo de extracción entre 5 y 10 minutos para una muestra de hasta 500 mL, lo que permite incrementar el número de análisis *in situ*, reduciendo tiempo y costo, y permite caracterizar un mayor número de muestras, logrando resultados precisos y confiables. Los análisis que actualmente se practican emplean más tiempo y generan residuos. Sus principales campos de aplicación son en ingeniería ambiental, industria de alimentos e ingeniería química.

15

ANTECEDENTES

Se realizó la búsqueda de información del Extractor de Gases Acelerado a través de un software con alcance mundial donde se usaron las siguientes Palabras Clave: extracción, gases, ultrasonido, sedimentos, muestreo *in situ*; los resultados fueron que no existen
20 coincidencias respecto a otra invención similar.

Anexo 6

Elsevier Editorial System(tm) for Sensors &

Actuators: B. Chemical

Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: DEVELOPMENT OF A NOVEL NON-DISPERSIVE INFRARED MULTI SENSOR FOR MEASUREMENT OF GASES IN SEDIMENTS

Article Type: Research Paper

Keywords: Biogas; Non-Dispersive Infrared Sensor; Anaerobic Digestion; Water; Sediment Pollution.

Corresponding Author: Dr. Nicolás Flores Alamo, Dr.

Corresponding Author's Institution:

First Author: FÉLIX-FERNANDO DE HOYOS-VÁZQUEZ, Dr.

Order of Authors: FÉLIX-FERNANDO DE HOYOS-VÁZQUEZ, Dr.; Maria-del-Carmen Carreño-de- Leon, Dra.; EDGAR-OSCAR Serrano-Nuñez, MSc; Nicolás Flores Alamo, Dr.; Marcos-Jose Solache-Ríos, Dr.

Abstract: A novel multi-sensor infrared non-dispersive (NDIR) was developed and used to measure carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) from river sediments. The infrared filters were developed considering the bandwidth (BW) and central wavelength (CWL) of the infrared spectra of gases. Experiments were performed using sediments from the Lerma River taken during the rainy and dry seasons in order to determine the dimensions of sensor and the gas concentration detection limits (SPAN). The sensor and the extraction chamber dimensions were determined based on the biogas yield under the extraction by ultrasound and specific methanogenic activity (SMA), while SPAN values were established from the results of gas concentration measured by gas chromatography. The ideal volume of sensor obtained was 2.23 mL and SPAN values were 20% and 10% for CH₄ and CO₂ respectively.

Suggested Reviewers: Wen Changbao dr
Institute of Micro-nanoelectronics, School of Electronics and Control Engineering
wchbdn@163.com
He has a lot of experience in the area of sensors

Xu Qiuxia Ph. D
Institute of Vacuum Microelectronics, School of Electronics and Information Engineering
xqx@ime.ac.cn
she has worked in research on gas sensors

Sérgio F. Aquino dr
Departamento de Química, Universidade Federal de Ouro Preto
ergio@iceb.ufop.br
He has knowledge about the gases generated as a result of the decomposition of organic matter

Cheikh Fall Dr.

DEVELOPMENT OF A NOVEL NON-DISPERSIVE INFRARED MULTI SENSOR FOR MEASUREMENT OF GASES IN SEDIMENTS

F. F de Hoyos-Vazquez¹, M. C. Carreño-de León¹, E. O. Serrano-Nuñez¹, N. Flores-Alamo^{1*}, M. J. Solache Ríos²

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Instituto Tecnológico S/N, Colonia Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México, México.

² Departamento de Química, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Apdo. Postal 18-1027, C.P. 11801, Cd. De México, México.

Abstract

A novel multi-sensor infrared non-dispersive (NDIR) was developed and used to measure carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) from river sediments. The infrared filters were developed considering the bandwidth (BW) and central wavelength (CWL) of the infrared spectra of gases. Experiments were performed using sediments from the Lerma River taken during the rainy and dry seasons in order to determine the dimensions of sensor and the gas concentration detection limits (SPAN). The sensor and the extraction chamber dimensions were determined based on the biogas yield under the extraction by ultrasound and specific methanogenic activity (SMA), while SPAN values were established from the results of gas concentration measured by gas chromatography. The ideal volume of sensor obtained was 2.23 mL and SPAN values were 20% and 10% for CH₄ and CO₂ respectively.

Keywords: Biogas; Non-Dispersive Infrared Sensor; Anaerobic Digestion; Water; Sediment Pollution.

* Author for correspondence. E-mail: nfloresa@toluca.tecnm.mx (NFA)
Tel. (+ 52) 722 2 08 72 18

1 Introduction

There are three reservoirs where pollutants may be found in a water body: water, sediment and biota. The production of greenhouse gases (GHG) in sediments of water bodies is affected by several physico-chemical factors, therefore the characterization of the soil and water is necessary to elucidate the mechanism of the liberation/absorption of gases, in order to evaluate the emission of these gases from the wetlands [1, 2, 3].

The physicochemical parameters that regulate the microbial processes and affect the production of GHG are the presence of oxygen, temperature, redox potential of sediment (Eh), pH, availability of carbon and nitrogen [4].

The main objective of the gas analysis is to determine their behaviour and production in the sediments of a water body and relate them to its quality, in addition to determine the emission rates to the environment.

Currently, there are not sensors available in the market to measure gases in sediment samples. The objective of this work was the development of a non-dispersive infrared sensor (NDIR), adaptable to a portable instrument for gas measurements in situ, to simplify the whole analytical process.

A NDIR sensor is a spectroscopic device often used as a gas detector [5] and it is based on the principle that gas molecules absorb discrete bands of infrared energy. This kind of sensor can be used to determine the gas concentration as CO, CO₂ and some hydrocarbons like propane and

Anexo 7



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Aguascalientes

Aguascalientes, Ags. 12/OCTUBRE/2018

OFICIO No. DA/1202/2018

A QUIEN CORRESPONDA:

Se hace constar que el artículo "Medidor de volumen de gases para biorreactores" se encuentra en proceso de evaluación por el Comité de arbitraje de la revista CONCIENCIA TECNOLÓGICA.

Los autores de dichos artículos, en orden de aparición son: Félix Fernando de Hoyos Vázquez, María del Carmen Carreño de León, María del Consuelo Hernández Berriel, Arturo Colin Cruz y Edgar Serrano Núñez.

CONCIENCIA TECNOLÓGICA es editada por el Departamento de Desarrollo Académico del Instituto Tecnológico de Aguascalientes desde 1997, cuenta con Comité Editorial y arbitraje estricto realizado por dos o tres revisores por artículo bajo el sistema doble ciego, tiene periodicidad semestral, número de registro ISSN 1405-5597 y se encuentra indexada en las siguientes bases de datos: **Redalyc** (<http://redalyc.org>), Sistema de información Científica administrado por la Universidad Autónoma del Estado de México, **Latindex** (<http://www.latindex.org>) de la universidad Nacional Autónoma del Estado de México, a **Dialnet** (<http://dialnet.unirioja.es>), portal bibliográfico de la Universidad de La Rioja, España así como a **DOAJ** (Directory of Open Access Journals, <http://www.doaj.org>).

Se extiende la presente para los fines que convengan a los interesados a los doce días del mes de octubre de dos mil dieciocho.

A T E N T A M E N T E

Ingenio, Cultura y Saber; que conducen a la Excelencia

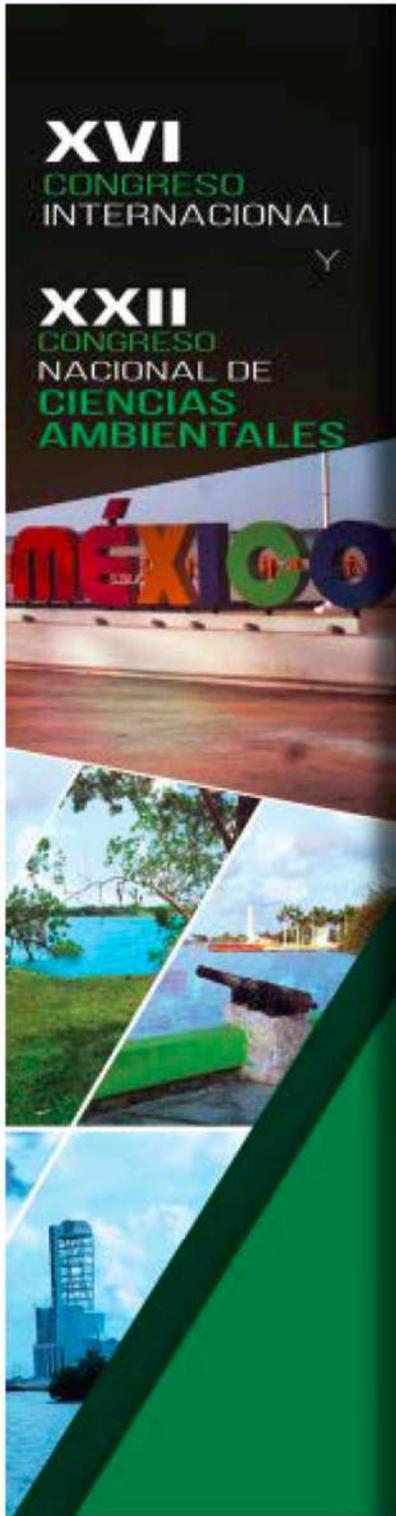
M. C. JESÚS MARIO FLORES VERDUZCO
DIRECTOR Y PRESIDENTE HONORARIO
DE CONCIENCIA TECNOLÓGICA

JMFV/RPR/GHS/eob



Av. Adolfo López Mateos #1801 ote.,
Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags.
C.P. 20256 Tels. 01(449)9105002
www.ita.mx

Anexo 8



MEMORIA



Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol. 34
Memorias de la Academia Nacional de Ciencias Ambientales 2017

Chetumal, Quintana Roo; 7, 8 y 9 de junio de 2017.
ISSN 0188-4999

DOI: 10.20937/2018.34.MANCA

CA-053

DISEÑO DE MULTI SENSOR PARA GEI Y TÓXICOS PARA EQUIPOS DE INVESTIGACIÓN AMBIENTAL**[DESIGN OF MULTI SENSOR FOR INVERNAL EFFECT AND TOXICS GASES FOR ENVIRONMENT RESEARCH EQUIPMENTS]**M.I.E Félix Fernando de Hoyos Vázquez[§], Dra. María del Carmen Carreño de León, Dra. María del Consuelo Hernández Berriel y Dr. Nicolás Flores Alamo.

Av. Tecnológico s/n. Colonia Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. De México, México C.P. 52149, Tel. (52) (722) 2 08 72 00,

§Autor para correspondencia (felixdehoyos@hotmail.com)

Palabras Clave: *Infrarrojo, inventario, concentraciones*

México ocupa el onceavo lugar como generador de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que está obligado a entregar a la ONU inventarios de los mismos cada año. Actualmente estos se calculan mediante fórmulas, que es útil en la quema de combustibles, para la degradación de materia orgánica en humedales, ríos, centros de disposición final de RSU es muy variable por lo que una fórmula no es suficiente, se deben hacer mediciones de las concentraciones reales para el cálculo de inventarios de GEI. En el mercado no hay variedad de medidores gases portátiles para el uso de investigación ambiental, los equipos disponibles son en su mayoría para el uso industrial, detección de fugas y seguridad industrial. El objetivo de esta investigación es diseñar un multi sensor de gases (CH_4 , CO_2 , H_2S y NH_3) que se adapte a las necesidades de la investigación ambiental, que cumpla con las características necesarias para determinar las concentraciones de gases, flujos, presiones, temperatura, etc., ya sea en cuerpos de agua o centros de disposición final de RSU. Después exhaustivo análisis bibliográfico, se determinó que el mejor método para la medición de gases es mediante la Absorción no dispersiva de luz infrarroja (en sus siglas en inglés Non Dispersive Infra Red, NDIR). Que consiste en enviar un haz de luz infrarroja modulada a 10 Hz dentro de una recámara de gases a un detector de IR con filtros pasa banda estrechos, al pasar la mezcla de gases por la recámara, estos absorben la luz IR, los filtros y detectores de cada gas se comparan con la señal de referencia y se hacen los cálculos correspondientes para la determinación de las concentraciones. Se analizaron las respuestas de las gráficas de IR de cada gas, para determinar las bandas de absorción para evitar interferencia entre los gases, teniendo resultados positivos para CH_4 , en la longitud de onda $3.31 \mu\text{m}$ y ancho de banda $90 \mu\text{m}$, el CO_2 en la longitud de onda de $4.26 \mu\text{m}$ ancho de banda de 120 nm y el NH_3 , en la longitud de onda de $10.4 \mu\text{m}$ y ancho de banda en 120 nm , los cuales quedaron integrados en el detector de IR con cuatro celdas, una de ellas para para la banda de referencia en la longitud de onda de $3.9 \mu\text{m}$ y ancho de banda de 90 nm , el sulfuro de hidrogeno quedo fuera, debido a que los demás gases le interfieren en todo su espectro útil, este tiene que ser individual y del tipo electroquímico. El diseño consiste en cinco partes: a) Fuente de luz IR Marca Micro-Hybrid, modelo JSIR350-5-BL-C, b) recámara de gases cilíndrica de 2.5 cm de diámetro, 10 cm de longitud, fabricada con aluminio y pintada de color negro mate, con dos orificios opuestos y separados 7.5 cm uno de otro, que sirven de entrada y salida de la mezcla de gases, c) filtros IR, d) Detector de IR, con cuatro sensores, marca Micro-Hybrid, modelo TS4X200B-A-S1.5, y f) circuitos del controlador de modulación y acondicionamiento de señales. Con el diseño de un multi sensor de gases orientado a la investigación ambiental, se reduce el tamaño de 3 a 1, que permite diseñar equipos de medición más compactos y ligeros,

Anexo 9



ciencias de la tierra, u.a.z.
minas y metalurgia • geología • c. ambientales

**La Academia Nacional de Ciencias Ambientales
y la Universidad Autónoma de Zacatecas
Francisco García Salinas
a través de
la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra
y la Licenciatura en Ciencias Ambientales**

Otorgan la presente

CONSTANCIA

A: Felix Fernando de Hoyos Vazquez, María del Carmen Carreño de León, María del Consuelo Hernández Berriel, Nicolás Flores Álamo, Arturo Colin Cruz.

Por: Su participación con el Cartel: "MEDIDOR DE VOLUMEN DE GASES EN REACTORES BIOLÓGICOS." en el marco del XVII Congreso Internacional y XXVIII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, celebrado en la ciudad de Zacatecas, Zac., del 11 al 15

Zacatecas, Zac, 15 de junio de 2018

Dr. Alberto Pereira Corona
Presidente ANCA

Dr. Santiago Valle Rodríguez
Secretario ANCA
Coordinador General Congreso 2018





EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PIEDRAS NEGRAS
OTORGA LA PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

MTRO. FÉLIX FERNANDO DE HOYOS VÁZQUEZ

POR SU VALIOSA PARTICIPACIÓN EN LA CONFERENCIA
ENERGÍA DE LA BIOMASA: "APROVECHAMIENTO DEL
METANO EN RELLENOS SANITARIOS", IMPARTIDA EN EL
SIMPOSIO NACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Y
ELECTRÓNICA 2018, "EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
SUSTENTABILIDAD", LLEVADO A CABO 16 AL 18 DE OCTUBRE.

PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA, A 16 DE OCTUBRE DE 2018.

"TÉCNICA Y HUMANISMO PARA REALIZAR EL ESPÍRITU"

ING. OSWALDO PADILLA GOROSAVE
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PIEDRAS NEGRAS



Reconocimiento

Al

M.C. FÉLIX FERNANDO DE HOYOS VÁZQUEZ

Por haber impartido la conferencia “Internet de las Cosas” dentro de las actividades del 6to. Congreso de Ingeniería en Sistemas Computacionales con el lema “Preparándose para innovar el futuro” celebrado del 16 al 18 de Noviembre del 2016.

“Recibimos Sabiduría, Legaremos Desarrollo”



Ing. José Ángel Esquivel Tovar
Director

Av. Melchor Ocampo # 2555. Col. Cuarto Sector. C.P. 60950. Cd. Lázaro Cárdenas, Michoacán,
Teléfono (753) 53 7 19 77, 53 2 10 40, 53 7 53 91, 53 7 53 92 Dirección Ext. 101
e-mail: direccion@itlac.mx internet: www.itlac.mx



Anexo 12



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PIEDRAS NEGRAS
OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

MTRO. FÉLIX FERNANDO DE HOYOS VÁZQUEZ

POR SU VALIOSA PARTICIPACIÓN EN LA IMPARTICIÓN DEL
CURSO - TALLER "MICROPROCESADORES TEXAS
INSTRUMENTS", EN EL SIMPOSIO NACIONAL DE INGENIERÍA
MECATRÓNICA Y ELECTRÓNICA 2018, "EFICIENCIA
ENERGÉTICA Y SUSTENTABILIDAD", LLEVADO A
CABO DEL 16 AL 18 DE OCTUBRE DE 2018

PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA, A 17 DE OCTUBRE DE 2018.

"TÉCNICA Y HUMANISMO PARA REALIZAR EL ESPÍRITU"

ING. OSWALDO PADILLA GOROSAVE
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PIEDRAS NEGRAS