



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO
MATEMÁTICAS

MAESTRIA EN FÍSICA APLICADA

**“OPTIMIZACIÓN DEL ALGORITMO DE
UN SISTEMA DE LOCALIZACIÓN DE
FUGAS DE GAS”**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

EN EL ÁREA DE:

FÍSICA APLICADA

PRESENTA:

JAVIER ANDREY MORENO GUZMAN

ASESORES:

DR. SEVERINO MUÑOZ AGUIRRE
DR. JUAN CASTILLO MIXCÓATL

MAYO 2014

INDICE

RESUMEN

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	JUSTIFICACIÓN	3
1.3	OBJETIVO GENERAL	5
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6

CAPITULO 2 MARCO TEORICO

2.1	INTRODUCCIÓN	7
2.2	SENSOR FIGARO TGS2620	7
2.3	MICROCONTROLADOR PIC16F877A	9
2.3.1	PROCESADOR RISC CON ARQUITECTURA HARVARD	10
2.3.2	MEMORIA DE DATOS	11
2.3.3	MEMORIA DE PROGRAMA (FLASH)	12
2.3.4	CONVERTIDOR ANALÓGICO / DIGITAL	13
2.3.5	TEMPORIZADOR TMR1	15
2.3.6	MODULADOR DE ANCHO DE PULSO	15

CAPITULO 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1	CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR	18
3.2	EVALUACIÓN BAJO LA CONCENTRACIÓN DE ETANOL	25
3.3	ECUACIÓN DESCRIPTIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL SENSOR	26

CAPITULO 4 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

4.1	REGISTROS DE PROPOSITO GENERAL.	29
4.2	INICIALIZACIÓN DE MODULOS Y PUERTOS.	29
4.3	PROGRAMA PRINCIPAL	30
4.4	RUTINA DE DESPLIEGUE DE INFORMACIÓN	32
4.5	CALIBRACION DE LOS SENSORES	35

4.6	RUTINA DE GIRO DE 180° (CLSATRAS)	38
4.7	RUTINA ADELANTE (CLSADELANTE)	40

CAPÍTULO 5 PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1	DESCRIPCIÓN DE LOS ESPACIOS EXPERIMENTALES	44
5.2	PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL ESPACIO CERRADO.	46
5.3	PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL ESPACIO ABIERTO.	49
5.4	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE AMBOS ESPACIOS.	52

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

RESUMEN

La localización de fugas de gas es importante ya que permite realizar operativos de seguridad antes de una posible catástrofe que suele generar daños graves tanto a bienes materiales (equipos industriales, domésticos, etc.) como a las personas expuestas (operarios, amas de casa, etc.). A su vez otra repercusión importante previsible es la interrupción del proceso productivo incluyendo en algunos casos la evacuación de la instalación. Anteriormente, para la localización de fugas de gas se utilizaba el olfato humano, este método era de poca precisión y alto riesgo para la salud de los operarios.

En la naturaleza, la tarea de localizar olores se realiza con la ayuda del olfato localizando la traza del olor generada por una corriente de aire y acercándose a la fuente de manera zigzagueante. Un ejemplo es la mariposa del gusano de seda donde las hembras son algo más grandes que los machos, y se mueven muy poco, en lugar de ello, expulsan feromonas, mostrando su órgano sexual. Los machos cuando detectan feromonas con sus antenas, se dirigen de manera zigzagueante aleteando sus alas hacia el lugar donde detectan más cantidad de feromonas. Una vez que encuentre a la hembra, realizará el cortejo, la rodeará y se aparearán los dos.

Actualmente en el Laboratorio del Cuerpo Académico de Optoelectrónica y Fotonica (CAOyF) de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM) se cuenta con un primer prototipo de un sistema localizador de fugas de gas, controlado por un microcontrolador PIC16F877A (Microchip) y equipado con sensores de gas TGS2620 (Figaro). Sin embargo, la efectividad del sistema es aún baja debido a diferentes problemas que presenta el sistema, tales como, la adquisición de datos de los sensores de gas con los que cuenta el equipo, el sistema de movimiento de las llantas y las limitaciones de la programación. En este trabajo se presentan los resultados de la reprogramación del algoritmo de localización del sistema, enfocándose principalmente al sistema de adquisición de datos de los sensores. Las comparaciones se realizaban tomando en cuenta únicamente la diferencia de lecturas de ambos sensores que en este caso eran caídas de

tensión tomadas del arreglo propuesto por el sensor. De igual manera en cada toma de decisión presentaba movimientos no tan directos para dirigirse a la fuente de olor lo que involucraba en ciertas decisiones el alejarse o desviarse de la estela de olor.

Se reprogramó el sistema para tener un rango de comparación más amplio considerando la concentración de etanol que existiese en el lugar de la toma de la lectura por parte de los sensores, con el fin de poder en un momento dado dirigirlo hacia la fuga de manera directa.

En las pruebas realizadas se eligieron dos espacios diferentes. Uno con un espacio cerrado y el otro abierto teniendo como similitudes las dimensiones (espacios relativamente rectangulares) y la distancia de separación de la fuente de olor (aproximadamente 4 mts). Los resultados que se obtuvieron fueron relativamente diferentes tanto en el acercamiento, lecturas de los sensores y en el tiempo que requirió el sistema en acercarse a la fuente de olor. A pesar de ello el sistema logró encontrar en las pruebas que se realizaron la fuente de olor, con diferentes desplazamientos que dependían de las condiciones ambientales así como del espacio en que se ubicaba.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La constante necesidad del ser humano de poder simplificar sus actividades diarias, nos lleva a la automatización de dichas actividades en donde no se requiera la presencia y control por medio de una persona, haciendo que el sistema que se encarga de dicha actividad sea completamente autónomo [1].

En las imágenes (Figura 1) podemos observar como la automatización se ha implementado tanto en la industria, en los hogares y hasta en lugares insospechados, todo con la finalidad de hacer más sencilla y eficiente la vida del ser humano.

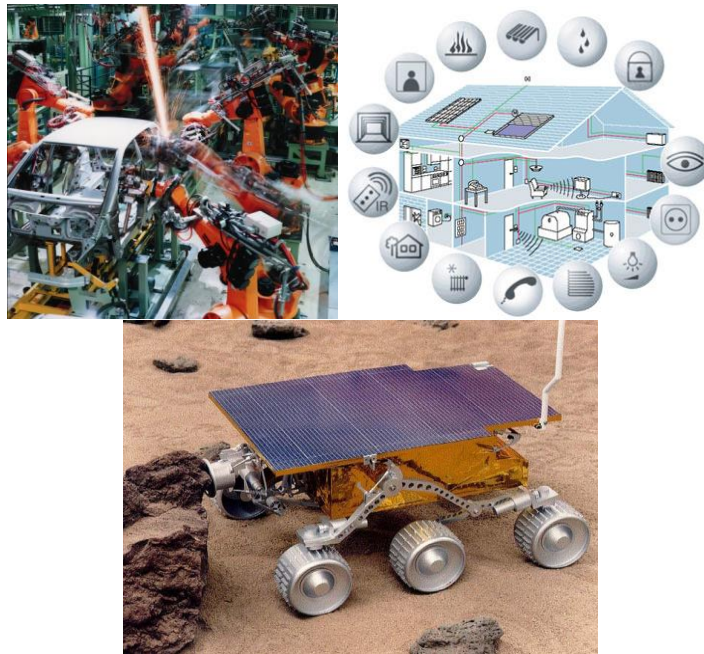


Figura 1. La automatización ha abarcado diferentes áreas, desde la industria hasta la robótica en la era espacial y la domótica.

En las diversas actividades laborales se necesita el monitoreo y control de ciertas magnitudes en diferentes lugares del ambiente laboral. Es ahí donde existe la necesidad de localizar ciertos olores (en este caso fugas de gas) en lugares específicos y para ello surge la necesidad de crear un sistema de localización de estas fugas de gas [1,5].

Anteriormente, para la localización de fugas de gas en ductos urbanos se realizaban perforaciones directamente sobre la vertical de la red [5,10].

Como se observa en la Figura 2 se insertaban tubos, a través de los cuales se utilizaba el olfato humano para localizar dichas fugas y por el olor se determinaba dónde se encontraba la mayor concentración. Este método era de poca precisión y alto riesgo para la salud de los operarios.

En la naturaleza para la detección de olores se encuentra el “Método de detección de feromonas de la mariposa del gusano de seda”. Un animal puede buscar comida, detectar el peligro, y encontrar al sexo opuesto usando el olor como fuente de información.

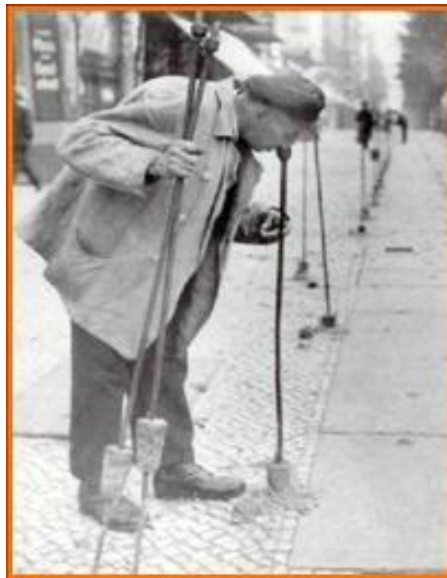


Figura 2. Localización de fugas en ductos urbanos.



Figura 3. Detección de feromonas de la mariposa del gusano de seda.

Este es el caso de la mariposa del gusano de seda que rastrea una estela de feromonas aéreas. El macho de este insecto muestra un comportamiento llamado “la danza de apareamiento” cuando es atraído por la feromona sexual de la hembra. Tal comportamiento es acompañado por una rápida vibración de las alas. Dicha vibración de las alas juega un papel muy importante en la localización de la fuente.

La columna de gas que se representa en la Figura 3, es un rastro aéreo de moléculas de olor con una concentración mayor dentro de la envoltura de la columna. Las moléculas de feromonas son atraídas al insecto por el viento producido por la vibración de las alas cuando la fuente está enfrente de la mariposa, pero cuando la fuente se encuentra atrás del insecto el viento de las alas aleja las moléculas. De esta forma, las vibraciones de las alas ayudan a determinar la dirección de la fuente de feromonas.

Después de establecer la dirección de la fuente de olor, la mariposa procede a seguir la traza con movimientos zigzagueantes de tal forma que se mantiene dentro de ella [8].

1.2 JUSTIFICACIÓN

La localización de fugas de gas es importante ya que permite realizar operativos de seguridad para la prevención de accidentes. En la naturaleza, esta tarea se realiza con la

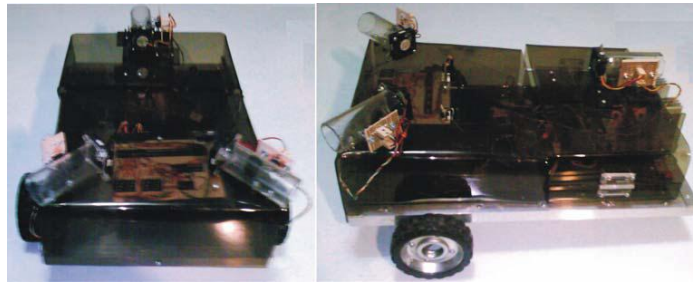


Figura 4. Imágenes del sistema de localización de fugas de gas.

ayuda del olfato localizando la traza del gas generada por una corriente de aire y acercándose a la fuente de manera zigzagueante. Actualmente se cuenta con un primer prototipo [5] de un sistema localizador de fugas de gas (Figura 4), manejado por un microcontrolador PIC16F877A (Microchip) y equipado con sensores de gas TGS2620 (Figaro) [5]. Sin embargo, la efectividad del sistema es aún baja debido a diferentes problemas que presenta tales como la adquisición de datos de los sensores de gas con los que cuenta el equipo, el sistema de movimiento de las llantas y las limitaciones de la programación. En este trabajo se presentan los resultados de la reprogramación del algoritmo de localización del sistema, enfocándose principalmente al sistema de adquisición de datos de los sensores donde el valor comparativo solo abarcaba de .2 a 2.4 volts considerando la caracterización del sensor (sección 3.1), esto nos daba como consecuencia el no tomar en cuenta el rango de 0 a 0.2 volts y de 2.4 volts a 5 volts que era el rango completo de conversión analógico-digital con una resolución de 4.8 mili Volts, esto limitaba la toma de decisión del sistema debido a que las comparaciones se realizaban tomando en cuenta únicamente la diferencia de lecturas de ambos sensores solo en ese rango de valores. Se reprogramó el sistema para tener un rango de comparación más amplio abarcando el rango de conversión de 0 Volts a 2.5 Volts que tendrá una resolución de 2.4 mili Volts, a través de un acondicionamiento de la señal de salida del sensor (Sección 3.1), con el fin de poder en un momento dado dirigir el sistema hacia la fuga de manera directa. En la Figura 5 se observa la comparativa de la toma de decisión.

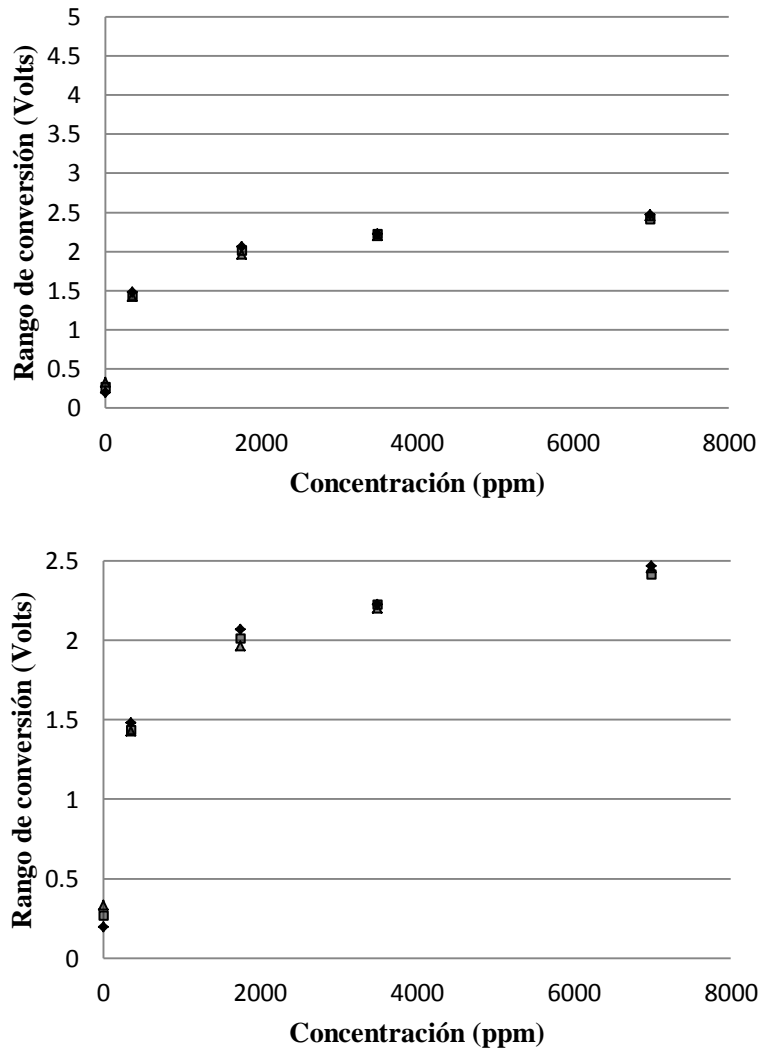


Figura 5. Comparativa del rango de valores para la toma de decisión del sistema anterior (grafica superior) y el sistema optimizado (grafica inferior).

1.3 OBJETIVO GENERAL

Mejoramiento del algoritmo y procedimiento electro-mecánico de un sistema de localización de fugas de gas.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comprensión y estudio del principio de operación del algoritmo implementado.
- Localización de posibles fallas en el algoritmo del sistema.
- Propuestas en el mejoramiento del algoritmo.
- Análisis y comprensión del procedimiento electro-mecánico del sistema físico.
- Detección de fallas de dicho sistema.
- Implementación de las nuevas mejoras al sistema electro-mecánico.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO

2.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de la captura y procesamiento de datos (traza del olor, en este caso particular Etanol), nos apoyamos en los sensores de gas TGS2620 (FIGARO-detección de etanol) y el microcontrolador PIC16F877A (Figura 6).

2.2 SENSOR FIGARO TGS2620

El sensor FIGARO TGS2620 se enfoca en la detección de vapores disolventes, en particular etanol [2].

Características:

- Bajo consumo de energía
- Alta sensibilidad al alcohol y vapores disolventes orgánicos
- Larga vida y bajo costo

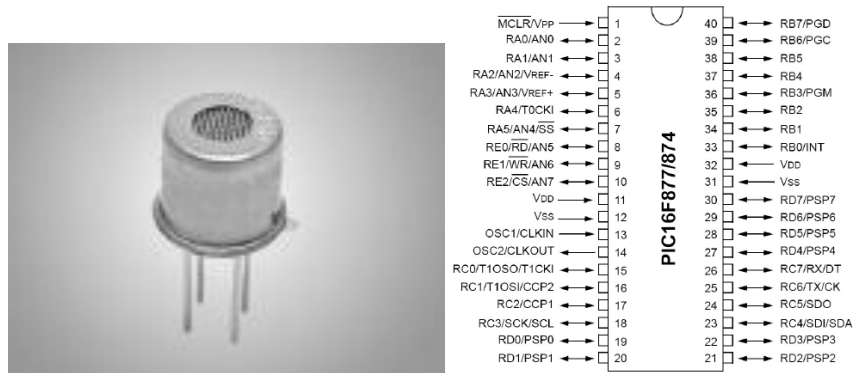


Figura 6. Sensor FIGARO TGS2620 (izquierda) y Microcontrolador PIC16F877A (derecha).

- Uso de un circuito eléctrico simple

Aplicaciones:

- Verificadores de alcohol
- Detectores/alarmas de vapores orgánicos
- Detectores de disolventes para fábricas e industrias de semiconductores

En la presencia de un gas detectable, la conductividad del sensor aumenta dependiendo de la concentración de gas en el aire. Un circuito eléctrico simple puede convertir el cambio en la conductividad a una señal de salida que corresponde a la concentración de gas.

El sensor TGS2620 requiere de 2 voltajes de entrada V_H y V_C que en este caso fueron de 5 V. V_H es el voltaje del calefactor provocando una corriente de 42 mA aproximadamente [2]. V_C es el voltaje que se aplica a la resistencia variable del sensor R_S conectado en serie con una resistencia de carga externa R_L la cual fue de 1 k Ω (Figura 7).

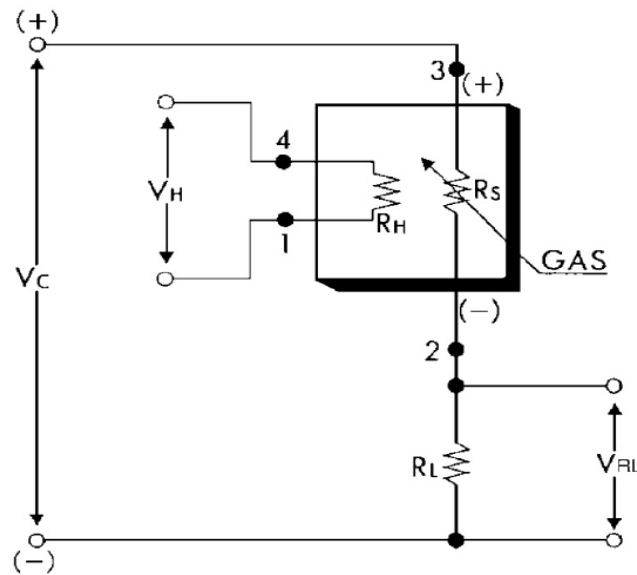


Figura 7. Circuito de implementación con el Sensor FIGARO TGS2620.

Cuando la resistencia R_S cambia el voltaje V_{RL} de la resistencia R_L varía de acuerdo a la Ecuación 1 que representa un divisor de voltaje.

$$V_{RL} = \frac{V_C R_L}{R_L + R_S} \quad (1)$$

2.3 MICROCONTROLADOR PIC16F877A

El PIC16F877A pertenece a una subfamilia de microcontroladores de la gama media, que se identifica por tener como memoria de programa una de tipo FLASH. Este modelo dispone de 5 puertos (RA, RB, RC, RD y RE) de E/S con un total de 33 líneas para conectar a los periféricos exteriores [11].

Características

- Procesador de arquitectura RISC avanzada
- Juego de 35 instrucciones con 14 bits de longitud. Todas ellas se ejecutan en un ciclo de instrucción, menos las de salto que tardan dos.
- Frecuencia de 20 MHz.
- Hasta 8 K palabras de 14 bits para la Memoria de Código tipo FLASH
- Hasta 368 bytes de Memoria de Datos RAM
- Hasta 256 bytes de Memoria de Datos EEPROM
- Encapsulados compatibles con los PIC16C73/74/76/77
- Hasta 14 fuentes de interrupción internas y externas
- Pila con 8 niveles
- Modos de direccionamiento directo, indirecto y relativo
- Perro Guardián (WDT)
- Código de protección programable

- Modo SLEEP de bajo consumo
- Programación serie en circuito por 2 terminales
- Voltaje de alimentación comprendido entre 2 y 5.5 V
- Bajo consumo (menos de 2 mA a 5 V y 5 MHz)

Recursos

- Timer0: temporizador-contador de 8 bits con predivisor de 8 bits
- Timer1: temporizador-contador de 16 bits con predivisor
- Timer2: temporizador-contador de 8 bits con predivisor y postdivisor
- Dos módulos de Captura-Comparación-PWM
- Conversor A/D de 10 bits
- Puerto Serie Síncrono (SSP) con SPI e I2C
- USART
- Puerta Paralela Esclava (PSP)

2.3.1 PROCESADOR RISC CON ARQUITECTURA HARVARD

Esta arquitectura aplicada por Microchip en sus microcontroladores se caracteriza por la independencia entre la memoria de código y la de datos. Los buses para instrucciones y datos son totalmente independientes y se ajustan a las necesidades de cada memoria, permitiendo el acceso simultáneo [3].

bancos con 128 bytes cada uno. En las posiciones iniciales de cada banco se ubican los Registros Específicos que gobiernan al procesador y sus recursos. La Figura 8 presenta los cuatro bancos de la RAM, indicando en las primeras posiciones de cada uno los nombres de los registros que contienen. En la parte de abajo se encuentran los registros de propósito general para guardar información que el usuario destine [3].

2.3.3 MEMORIA DE PROGRAMA (FLASH)

Existen 3 bloques de memoria de programa en el microcontrolador PIC16F877A (Figura 9). En uno de estos se encuentra un contador de programa de 13 bits capaz de direccionar una palabra de los 8K x 14 bits de espacio de la memoria de programa. En el siguiente bloque se refiere a la llamada pila que guarda la dirección de las instrucciones de

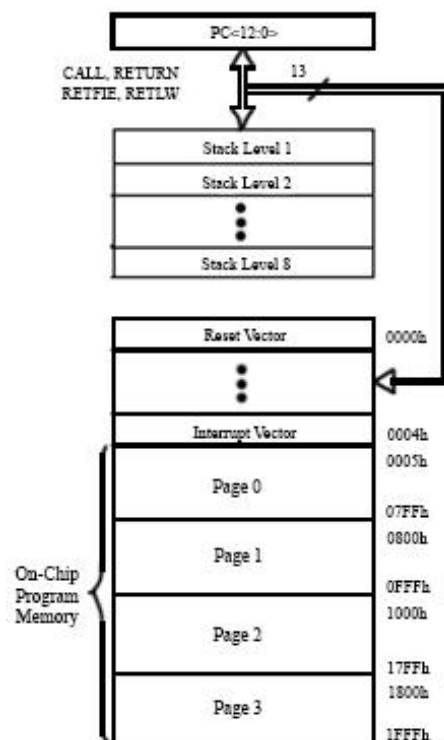


Figura 9. Distribución de la memoria de programa del PIC16F877A.

salto (CALL, RETURN, RETFIE, RETLW y GOTO) y el último es el de memoria de programa que consiste de 4 paginas (numeradas de 0 a 3) de 2048 registros de la página 1 a la 3 y la pagina 0 de 2042 registros donde se encuentra el código del programa.

El contador de programa (PC) es de 13 bits. El byte menos significativo proviene del registro PCL, el cual se puede leer y escribir. Los 5 bits más significativos (PC <12:8>) no se pueden leer, pero se puede escribir indirectamente a través del registro PCLATH. Al considerar solamente 11 bits para el contador de programa (PCL<7:0> y PCLATH<2:0>) llegaremos al valor máximo de 2048 siendo el mismo valor máximo en las páginas 1 a la 3 (0 a 2047) y en la página 0 con un valor de 2042, esto implica que sin importar su lectura de los bits más significativos (PC <12:8>) del contador de programa (PC) basta con escribir en los bits PCLATH<4:3> para poder acceder a las páginas 0 a 3 de la memoria de programa.

Las instrucciones de salto CALL y GOTO sólo proporcionan 11 bits de la dirección a saltar. Esto limita el salto dentro de cada página a máximo 2 K. Cuando se desea salir de la página actual hay que programar correctamente. Para ello nos apoyaremos en el registro específico PCLATH [3].

2.3.4 CONVERTIDOR ANALÓGICO / DIGITAL

La microcontrolador PIC16F877A posee un conversor Analógico/Digital de 10 bits de resolución y 8 canales de entrada. La resolución que tiene el CAD por cada bit procedente de la conversión tiene un valor que es función de la tensión de referencia Vref, de acuerdo con la siguiente ecuación (Ecuación 2).

$$Resolución = \frac{(Vref+) - (Vref-)}{1024} = \frac{Vref}{1024} \quad (2)$$

Al utilizar un voltaje de referencia $V_{ref+} = 2.5 \text{ VDC}$ y la V_{ref-} como tierra, la resolución será de 24.4 mV/bit . Por tanto, a la entrada analógica de 0 V le corresponde una conversión digital de $00\ 0000\ 0000$ y para la de 2.5 V una lectura digital de $11\ 1111\ 1111$. La tensión de referencia determina los límites máximo y mínimo de la tensión analógica que se puede convertir. El voltaje diferencial mínimo es de 2 V .

El resultado de la conversión se deposita en el par de registros ADRESH (parte alta del resultado de la conversión) y ADRESL (parte baja del resultado de la conversión), que al estar compuesta por 10 bits, sólo son significativos 10 de los bits de dicho par de registros.

El bit de menos peso (ADFM) del registro ADCON1 selecciona el formato del resultado de la conversión. Si vale 1, el resultado está justificado a la derecha en el registro concatenado formado por ADRESH (que tiene sus 6 bits de más peso a 0) y ADRESL; mientras que si vale 0 la justificación se realiza a la izquierda de igual manera en el registro concatenado ADRESH y ADRESL (donde este último tiene sus 6 bits de menos peso a 0). En la Figura 10 se muestran los dos formas posibles del alineamiento del resultado sobre la el par de registros ADRESH y ADRESL [3].

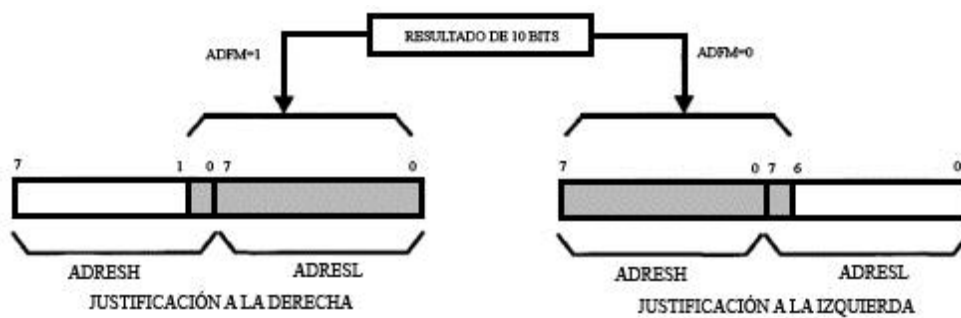


Figura 10. Alineamiento de la conversión digital de 10 bits.

2.3.5 TEMPORIZADOR TMR1

El temporizador TMR1 consiste en un temporizador/contador ascendente de 16 bits leíble y escribible que trabaja con los registros TMR1H y TMR1L de 8 bits cada uno. Tiene selección de reloj interno o externo, interrupción opcional por desbordamiento de FFFFh a 0000h que son los valores máximos y mínimos de su conteo, respectivamente y un posible reinicio desde los módulos CCP.

El TMR1, al ser de 16 bits requiere el uso de dos registros concatenados de 8 bits: TMR1L:TMR1H, que son los encargados de guardar el valor del conteo en cada momento. Dicho valor evoluciona desde 0000h hasta FFFFh, instante en el que se activa el señalizador TMR1IF y se regresa al valor inicial 0000h [3].

El TMR1 es capaz de funcionar de tres formas como temporizador, contador síncrono y contador asíncrono. En el modo temporizador el valor concatenado TMR1H:TMR1L se incrementa con cada ciclo de instrucción ($F_{ocs}/4$) [3].

2.3.6 MODULADOR DE ANCHO DE PULSO

El microcontrolador PIC16F877A dispone de dos módulos CCP, llamados CCP1 y CCP2 que pueden realizar tres funciones principales: modo captura, modo comparación y modulación de ancho de pulso (PWM).

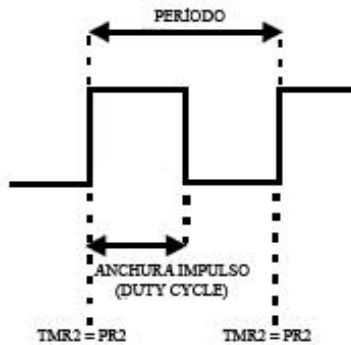


Figura 11. Señal generada por los módulos CCP1 y CCP2.

El modulador de ancho de pulso proporciona impulsos lógicos cuyo nivel alto es de duración variable, utilizados para el control de motores de CD. Los módulos CCP1 y CCP2 se encuentran en los pines RC2 y RC1, respectivamente. A través de estas terminales se genera un impulso cuyo nivel alto tenga una anchura de variable (Duty Cycle) dentro del intervalo del período de trabajo (Figura 11).

Cuando se trabaja con una precisión de 10 bits, los 2 bits CCP1CON<5:4> se concatenan con los 8 de CCPR1L y, de la misma forma, los 8 bits de más peso del TMR2 se concatenan con los dos bits de menos peso del reloj interno, haciendo que el TMR2 cuente cada T_{osc} en vez de cada $4 \cdot T_{osc}$.

El tiempo que dura el período de la onda depende del valor cargado en PR2, según la Ecuación 3.

$$\text{Período} = [(PR2) + 1] * 4 * T_{osc} * \text{Valor Predivisor TMR2} \quad (3)$$

Hablando solo del módulo CCP1 el tiempo en que la salida está en nivel alto, que es el ancho del impulso, depende del contenido cargado en CCPR1L y de los dos bits 5 y 4 del registro CCP1CON, cuando se trabaja con una precisión de 10 bits. El valor CCPR1L:CCP1CON<5:4> puede cargarse en cualquier momento, puesto que el mismo no

se traspa a CCPR1H y se compara hasta que coincidan PR2 con TMR2. La fórmula que determina el ancho del impulso se observa en la Ecuación 4.

$$\text{Anchura impulso} = (\text{CCPR1L: CCP1CON} < 5: 4 >) * T_{osc} * \text{Valor Predivisor TMR2} \quad (4)$$

En el modo PWM el registro CCPR1L sólo puede ser leído [3].

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR

Este procedimiento se realizó para obtener un modelo matemático del comportamiento del sensor con diferentes cantidades de etanol, para ello se realizaron pruebas de respuesta en estado estable usando el circuito de la figura 6. En una cámara de teflón de 1.21 litros de volumen se inyectó etanol en cantidades que van de 1 a 20 μl , lo que cubre un rango de 349 ppm a 6987 ppm de concentración (Figura 12). Para calcular la concentración en ppm dentro del recipiente se utilizó la Ecuación 5.

$$C_{ppm} = \frac{22.4\rho T_s V_l * 10^3}{273PMV_g} \quad (5)$$

- ρ Densidad de la muestra líquida (0.79 para etanol).
- T_s Temperatura de la cámara aproximadamente 300 K para temperatura ambiente.
- V_l Volumen de la muestra líquida a inyectar en μl .
- PM Peso molecular de la muestra a inyectar (46 para etanol).
- V_g Volumen de la cámara (en esta caso 1.21 litros).

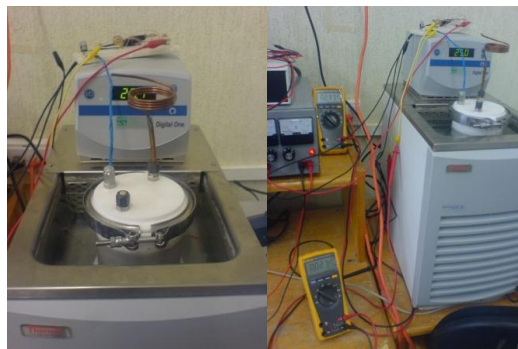


Figura 12. Arreglo experimental para la toma de lecturas con diferentes cantidades de Etanol.

Tabla 1. Voltajes obtenidos de las tomas de etanol.

1ª. Toma		2ª. Toma		3ª. Toma	
Concentración ppm	Vo (VL)	Concentración ppm	Vo (VL)	Concentración ppm	Vo (VL)
0	0.19	0	0.27	0	0.33
349	1.48	349	1.43	349	1.42
1746	2.06	1746	2.01	1746	1.96
3493	2.22	3493	2.22	3493	2.20
6987	2.46	6987	2.41	6987	2.45

En la Tabla 1, se muestra las mediciones que se obtuvieron con respecto a la caída de voltaje en RL y enseguida la gráfica (Figura 13) de las 3 pruebas diferentes realizadas en la cámara.

En la Figura 14 se muestran las mediciones que se obtuvieron al caracterizar el sensor en una escala logarítmica y en una concentración dada en partes por millón. R_S es la resistencia interna del sensor y R_O es la resistencia del sensor en 300 ppm de etanol a temperatura ambiente, en ella se observa la comparativa de la caracterización con los datos

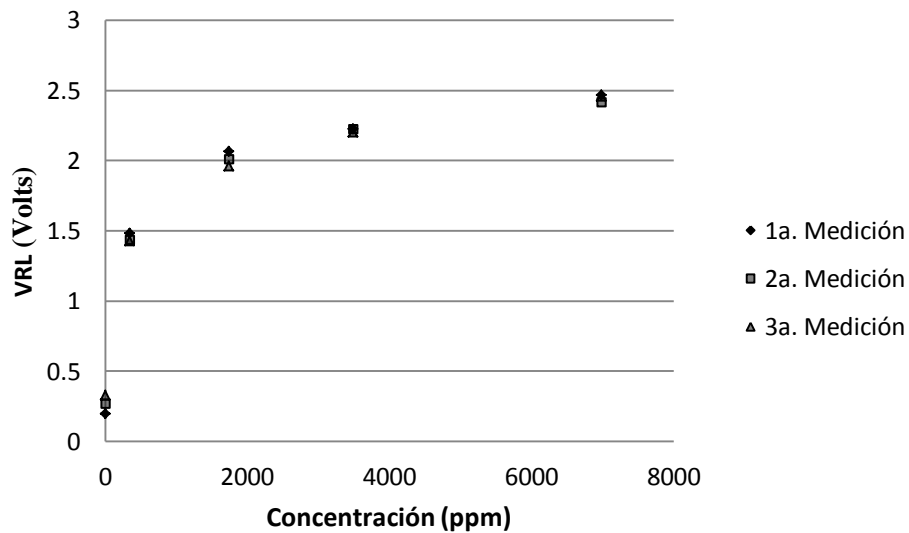


Figura 13. Lecturas obtenidas en V_{RL} con la aplicación de Etanol en ppm.

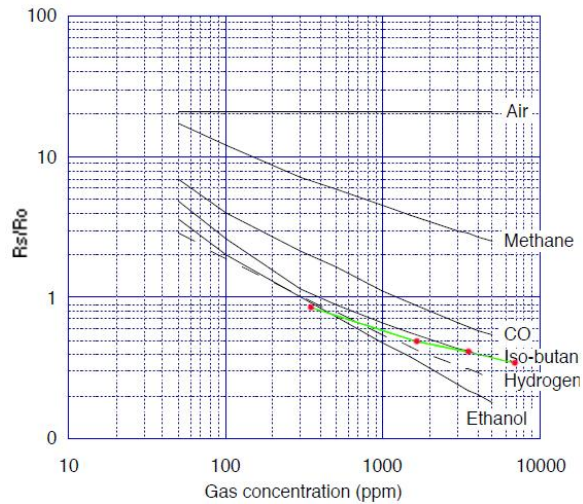


Figura 14. Comparación de la caracterización del sensor con las hojas técnicas del sensor TGS2620.

técnicos del sensor TGS2620 de la marca FIGARO.

En las pruebas realizadas no logra alcanzarse un voltaje mínimo de 0 V y un voltaje máximo de 5 V en VRL. Esto ocasiona que no se pueda tomar todo el rango de 0 a 5 V una vez que se realice la conversión analógica-digital de dicha señal por parte del microcontrolador PIC16F877A para su procesamiento. Es por ello que se optó en adecuar la señal para todo el rango disponible (0 – 5 V) mediante el circuito restador con ayuda de un Opamp TL081. Para poder iniciar la lectura del voltaje con 0 Volts, una vez logrado este propósito se optaría en amplificar dicha señal para abarcar todo el rango disponible, para ello nos apoyamos con el mismo Opamp TL081 con configuración en Amplificador no inversor. Cabe mencionar que se necesita una alimentación de tipo simétrico para la activación de los amplificadores operacionales TL081, para ello nos apoyamos en la configuración de tierra virtual para trabajar con una sola fuente de alimentación de 12 V (Figura 15). Las configuraciones que se utilizaron para el amplificador operacional son el circuito restador y amplificador no inversor que se muestran en la Figura 16 [9].

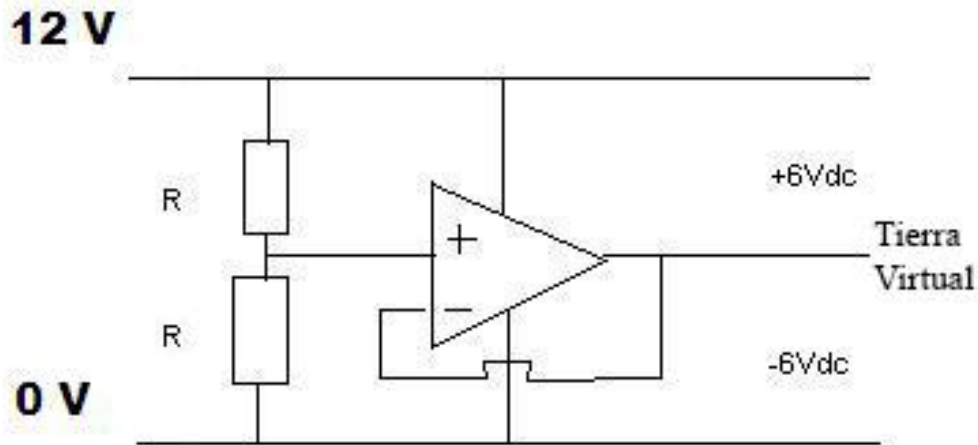


Figura 15. Voltaje simétrico obtenido de una sola fuente de 12 V.

Los valores que se utilizaron para las resistencias de la configuración restador fueron de $1\text{ K}\Omega$ para todas las resistencias para así obtener una simple resta de voltajes de $V_2 = 0.27\text{ V}$ que es el voltaje V_L y $V_1 = 0.258\text{ V}$ que se obtiene de un divisor de voltaje de una resistencia de $10\text{ K}\Omega$ y una resistencia de $220\ \Omega$ con una voltaje de alimentación de 12 V , obteniendo así aproximadamente un voltaje de salida del restador de 0 V .

De la misma manera para la configuración amplificador no inversor se utilizó las resistencias de $R_1 = 1500\ \Omega$ y $R_2 = 2000\ \Omega$ para obtener una ganancia de 2.33 aproximadamente para alcanzar el rango de 5 V .

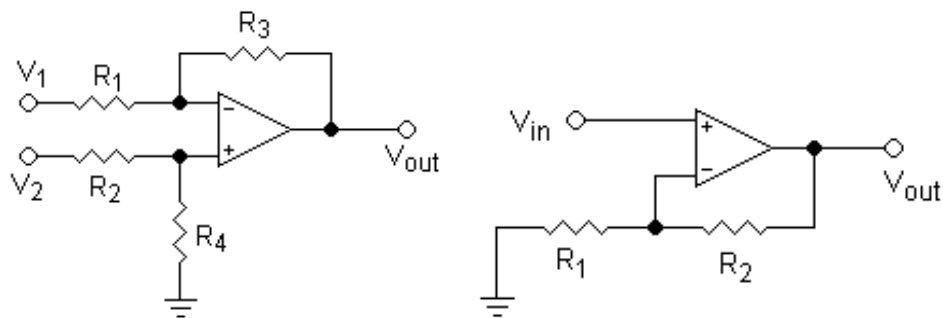


Figura 16. Circuitos Restador y Amplificador no inversor respectivamente.

Estos análisis se apoyan con las ecuaciones para la configuración restador y amplificador no inversor (Ecuación 6 y 7 respectivamente).

$$V_{out} = V_2 \left[\frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} \right] - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right) \quad (6)$$

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (7)$$

Los datos calculados se pueden observar en la Tabla 2 donde se muestra el efecto del voltaje restado y amplificado para alcanzar el rango de 0 a 5 V.

Una vez implementado los circuitos mencionados se obtuvieron los datos correspondientes a las caídas de voltaje en RL (V_{RL}), con las mismas cantidades de Etanol de la medición anterior, como lo muestra la Figura 17.

Se observa que se logra alcanzar un voltaje mínimo de 0.18 V y un voltaje máximo de 5.12 V, alcanzando el rango total que se propuso.

A pesar de ello no se obtuvieron dichos valores al caracterizar el sensor con el

Tabla 2. Datos calculados con respecto al circuito implementado.

Concentración ppm	V_L	Ganancia	V_o
0	0.33	2.33	0.18
349	1.42	2.33	2.72
1746	1.96	2.33	3.98
3493	2.20	2.33	4.54
6987	2.45	2.33	5.12

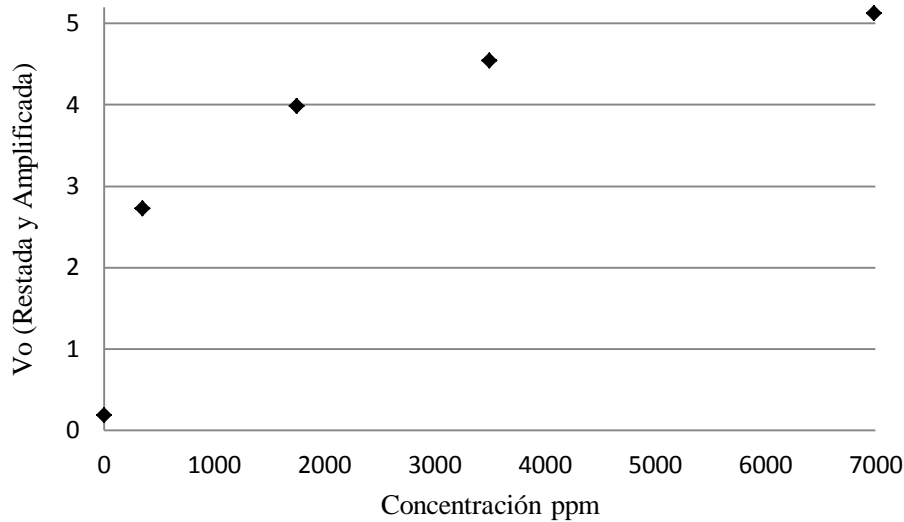


Figura 17. Lecturas en VRL con el circuito propuesto con la aplicación de Etanol.

circuito ya implementado el cual la parte de la resta la hace correctamente pero la etapa de amplificación no la realiza adecuadamente a lo calculado. Esto es debido al acoplamiento de impedancias y que el voltaje de la fuente decae en su suministro de corriente debido a la carga del microcontrolador y los motores que comparten dicha fuente, lo que decide a buscar otra opción para abarcar todo el rango de conversión de 0 a 5 volts.

Este problema se observa en la Figura 18 obtenida de la caracterización del sensor en la cámara de teflón de 1.21 litros de volumen con el circuito implementado, inyectando en él las mismas cantidades de etanol que van de 1 a 20 ul, (1ª. toma=1ul, 2da. Toma=5 ul, 3ª. Toma=15 ul y 4ª. Toma= 20 ul.) lo que cubre un rango de 349 ppm a 6987 ppm.

Para solucionar este problema se toma directamente los voltajes de la resistencia de carga (R_L) del sensor para realizar la conversión analógica-digital y reduciendo el voltaje de referencia de la conversión, tomando el voltaje de 0V (GND) como voltaje de referencia negativo (V_{ref-}) y como voltaje de referencia positivo (V_{ref+}) al voltaje de 2.5 volts tomada por un divisor de voltaje de 2 resistencias de 1 k Ω cuya fuente de

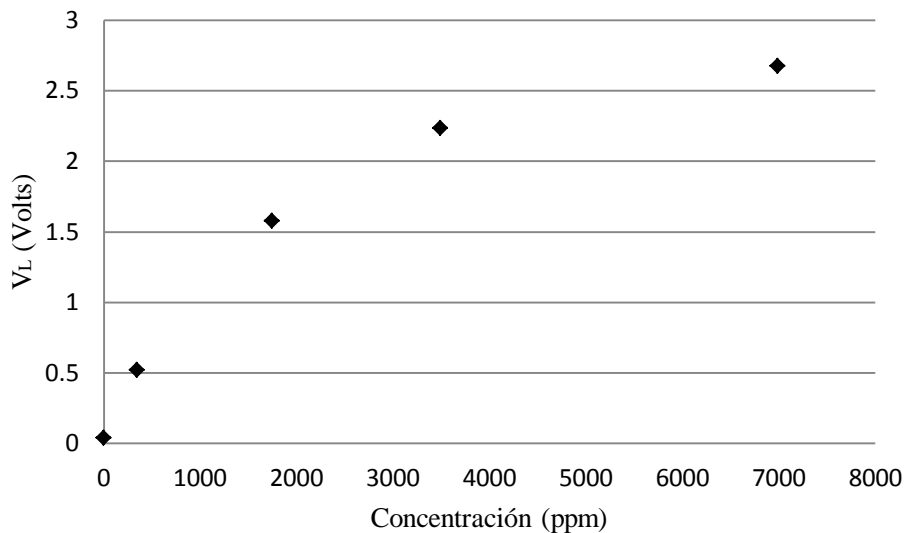


Figura 18. Caídas de tensión en la resistencia de carga (V_L) con el circuito propuesto.

alimentación es de 5 volts que es obtenida de un regulador de voltaje que este mismo es alimentado por la batería del sistema (12 volts), Estos voltajes de referencia sirven como parámetros para la resolución del convertidor analógico-digital del microcontrolador, todo esto en base a la Ecuación 2 que se presentó anteriormente (sección 2.3.4.).

Al considerar estos parámetros ya no fue necesario la amplificación de la tensión (V_L) solo se tomó la parte de la resta con el amplificador operacional (TL081), los resultados de la resta, su conversión a lectura digital y la reducción del rango de conversión se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos obtenidos del circuito restador y la conversión analógica – digital.

Concentración ppm	Vo (VL)	Voltaje a restar (VR)	Voltaje restado	Lectura Digital
0	0.33	0.25	0.08	33
349.37	1.42	0.25	1.17	479
1746.86	1.96	0.25	1.71	700
3493.73	2.20	0.25	1.95	799
6987.47	2.45	0.25	2.20	901

3.2 EVALUACIÓN BAJO LA CONCENTRACIÓN DE ETANOL

Los datos presentados en la Tabla 3 se pueden observar en la Figura 19 ahora con la conversión analógica-digital y cambiando los ejes del gráfico como variable independiente al voltaje V_L (en forma digital) y como variable dependiente a la concentración en ppm de etanol.

La justificación que se tiene para este cambio en las variables es debido a que el prototipo que se tiene en el laboratorio, las comparaciones se realizan directamente en voltaje. Sin embargo, puesto que el comportamiento del sensor no es lineal, se puede tener un error muy grande al tomar decisiones basados en estos valores de voltaje, por lo que la forma correcta de realizar la detección debe basarse en la concentración del gas en esa posición para una mejor toma de decisión del sistema.

El siguiente paso es realizar una aproximación con una función matemática de la respuesta digital obtenida en función de la concentración de etanol. Esto se realiza con la

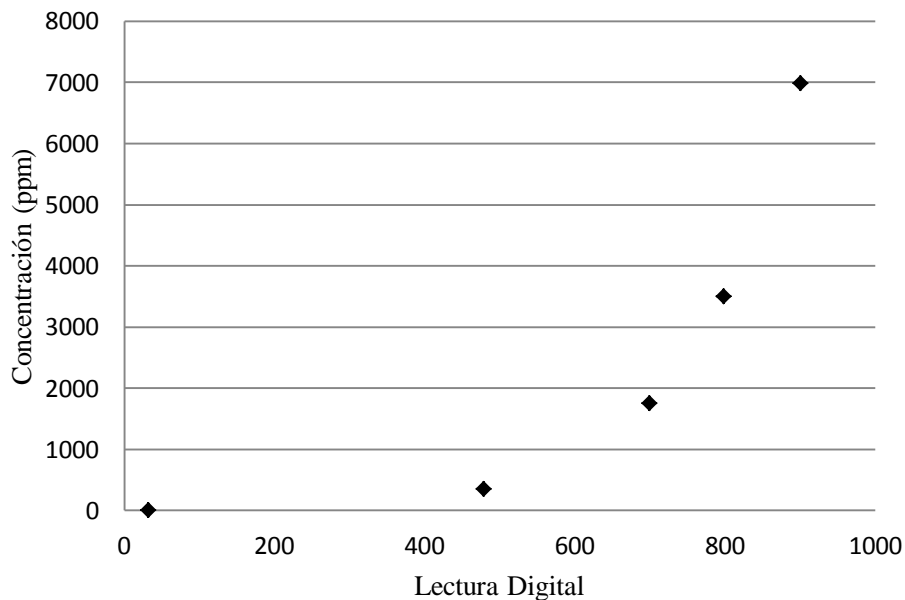


Figura 19. Comportamiento del sensor con intercambio de los ejes y la conversión A/D.

finalidad de introducir dicha función matemática al programa del microcontrolador para obtener las lecturas de los sensores y calcular las concentraciones en ppm de etanol para la tomas de decisiones del sistema.

3.3 ECUACIÓN DESCRIPTIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL SENSOR

Deducimos una ecuación para representar matemáticamente el comportamiento del sensor debido que los datos provienen de medidas físicas y es posible que se tengan algunos errores significativos. Es por ello que es recomendable la aproximación de la función utilizando los promedios de los puntos de diferentes medidas físicas, los puntos mostrados en la Figura 20 son el resultado de diferentes mediciones.

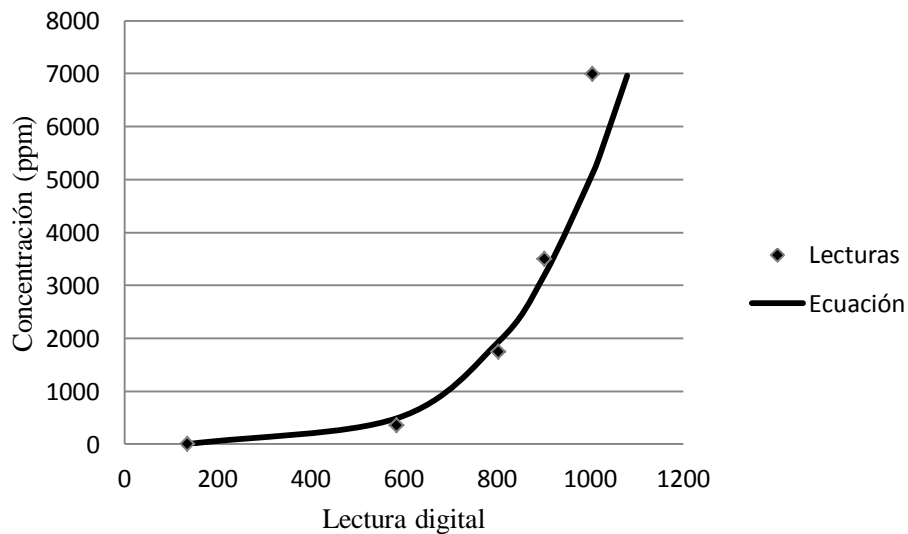


Figura 20. Mediciones experimentales y el polinomio tomando en cuenta la concentración de etanol.

La ecuación que se obtiene es través del apoyo del software Microsoft Excel (Ecuación 8).

$$P(x) = 5 * 10^{-10} x^{4.333} \quad (8)$$

La ecuación 8 que aproxima las lecturas presenta el problema de alejarse del comportamiento del sensor en concentraciones altas (de 4000 ppm en adelante). Además, también resulta ser complicada para introducirla al programa en el microcontrolador (Lenguaje Ensamblador). Es por ello que se optó por realizar la aproximación en 3 ecuaciones lineales a las lecturas del comportamiento del sensor. Estas ecuaciones lineales las deducimos a través de las formas “Pendiente de una Recta” y “Punto-Pendiente de una Recta” [4] que se muestran en la Ecuación 9.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad y - y_1 = m(x - x_1) \quad (9)$$

Las ecuaciones que se deducen a través de estas herramientas matemáticas son:

$$y_1 = 0.59x \quad y_2 = 5.92x - 3134.66 \quad y_3 = 31.66x - 24352.40 \quad (10)$$

Como se puede observar al ser ecuaciones lineales solo se tendrán que hacer operaciones aritméticas simples para poderlas calcular dentro del programa que se graba en el microcontrolador. Solo existe la restricción que las constantes manejan cantidades con decimales, es por ello que se redondea para hacer fácil su implementación en el programa del microcontrolador. Las expresiones resultantes se muestran en la Ecuación 11.

$$y_1 = \frac{x}{2} \quad y_2 = 6x - 3135 \quad y_3 = \frac{63x}{2} - 24352 \quad (11)$$

Una vez obtenidas y redondeadas estas ecuaciones las graficamos junto a las lecturas del comportamiento del sensor para observar la aproximación de estas rectas (Figura 21).

Al trabajar con estas ecuaciones solo utilizaremos operaciones básicas aritméticas para implementarlas en el programa del microcontrolador, el reto se encuentra en la forma debido a que se programara en lenguaje ensamblador, la justificación para utilizar ensamblador se enfoca en el ahorro de memoria flash, una mejor estructura de la programación y la depuración del programa para detectar errores de ejecución.

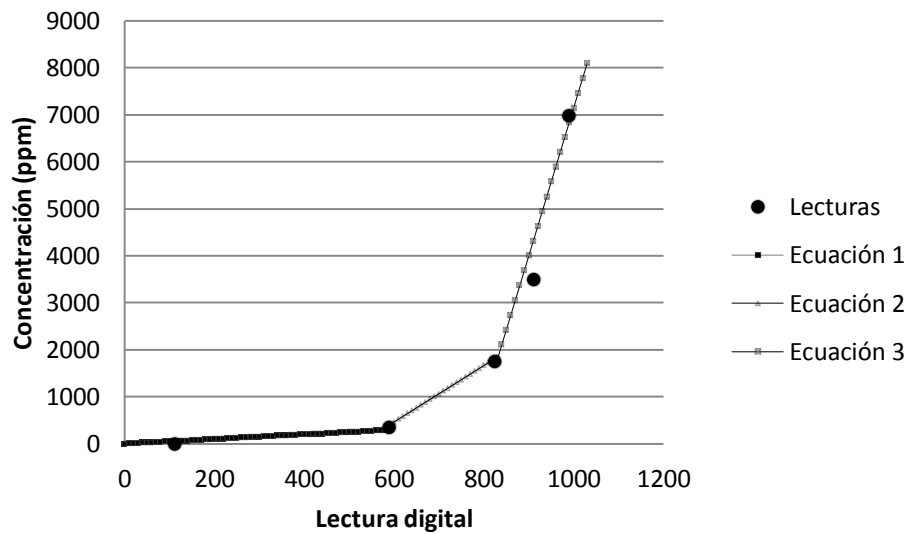


Figura 21. Comportamiento del sensor y la aproximación con las ecuaciones lineales.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

4.1 REGISTROS DE PROPOSITO GENERAL.

El programa implementado hace uso de registros de propósito general que se encuentran en los bancos de memoria de datos mencionados en la sección 2.3.2, los cuales tienen una capacidad de 1 byte para guardar información que se usa para manipular los módulos periféricos (PWM, Timers, ADC, Vref, etc) y control de rutinas de ejecución del propio programa. Estos registros de propósito general se encuentran limitados en el microcontrolador siendo de 368 existentes en el PIC16F877A, cuya distribución se muestra en la Tabla 4, respecto a los bancos de memoria.

Debido a que en el programa que se implementó en el microcontrolador se ocuparon 144 registros de propósito general se necesita cambiar de banco (en este caso el banco 1) para acceder a ellos, cada vez que se necesiten tanto en rutinas como en módulos periféricos, es por ello el constante cambio de banco durante ciertas partes del programa del microcontrolador.

4.2 INICIALIZACIÓN DE MODULOS Y PUERTOS.

Al inicio del programa del microcontrolador se inicializa los puertos B, C, D, y E como salidas digitales y el puerto A en las terminales RA0, RA1, RA2, RA3 y RA4 como

Tabla 4. Distribución de registros generales en los bancos de memoria.

Banco 0	Banco 1	Banco 2	Banco 3
96 Bytes	80 Bytes	96 Bytes	96 Bytes

entradas digitales (posteriormente en otra subrutina se iniciaran como entradas analógicas para el convertidor analógico digital). Posteriormente se muestra un mensaje en los display de 7 segmentos (sección 4.4) indicando el inicio del programa (el mensaje consiste en mostrar los números 1234).

Posteriormente se realiza la inicialización del convertidor analógico digital (ADC), en él se configura que el resultado de la conversión sea de resolución de 10 bits y se obtenga de los registros ADRESH y ADRESL con alineamiento a la izquierda, asignación del puerto RA3/AN3 como el voltaje de referencia Vref de la conversión, la asignación del tiempo de conversión a 1.6 microsegundos y asignación de los puertos RA0/AN0, RA1/AN1 y RA2/AN2 como analógicos.

Enseguida se configura el Timer 1 (TMR1 sección 2.3.5) para desactivar el permiso de interrupción por desborde, seleccionamos la fuente de impulsos en este caso la del reloj interno con frecuencia de oscilación $F_{osc}/4$ para los tiempos de temporización.

Posteriormente configuramos los módulos CCPXCON para que trabajen como moduladores de ancho de pulso (PWM sección 2.3.6) con un período de 10.2 microsegundos ó 98 kHz aproximadamente, asignamos el valor de cero a los registros encargados (CCPR1L:CCP1CON<5:4>) de la anchura de pulso de nuestra señal para mantenerla en un principio en cero.

La siguiente subrutina de refiere a la calibración de los sensores que se presentara en la sección 4.5.

4.3 PROGRAMA PRINCIPAL

Para la comprensión del programa principal se muestra el siguiente diagrama de flujo (Figura 22).

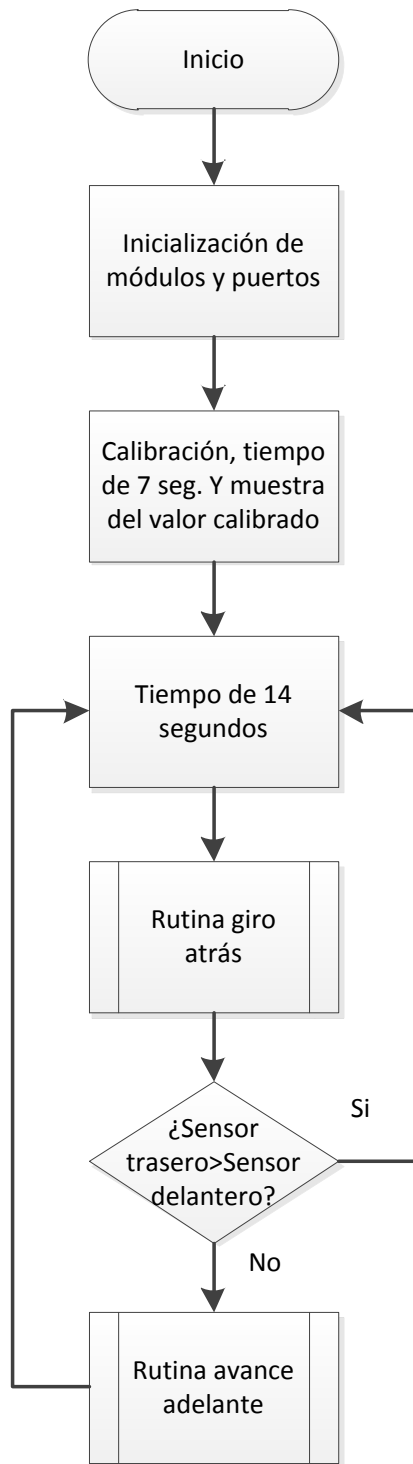


Figura 22. Diagrama de flujo que muestra el programa principal.

Al inicio, esperamos un tiempo aproximado de 7 segundos para completar los 53 segundos que se ocupan en la subrutina de calibración para obtener un tiempo de 1 minuto aproximadamente antes de empezar con el programa principal.

Una vez transcurrido el tiempo mencionado mostramos en los display's el valor de la calibración en la subrutina anterior, posteriormente se toma otro tiempo de 14 segundos sumados con los 16 segundos que tarda las subrutinas de decisión (CLSATRAS y CLSADELANTE sección 4.6 y 4.7 respectivamente) para completar 30 segundos entre cada toma de decisión.

4.4 RUTINA DE DESPLIEGUE DE INFORMACIÓN

El proceso de la rutina se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 23. El sistema de localización de fugas de gas cuenta con 4 display's de 7 segmentos nombrados de izquierda a derecha como unidades, decenas y centenas para representar una cantidad decimal y el cuarto display que se conocerá como el de referencia (Figura 24) el cual mostrará diferentes informaciones que son el número del sensor (véase figura 29) que tenga el mayor valor de concentración de etanol en esa área. También indicará cuando se realice un desplazamiento recto por parte del sistema mostrando el número 4 en el display y el valor de la calibración de los 3 sensores mostrando en el display el número 0. Toda esta información importante se presenta durante la rutina del programa del sistema, para mostrar dicha información nos basamos en el método de conversión del sistema numérico binario al código BCD [7], ya que al obtener la información en BCD pasaran a la etapa de decodificación (con ayuda de los integrados 7447 para cada display) para pasar posteriormente a mostrarse en los display's.

Este método consiste en trabajar la información que se mostrará en los display's de manera binaria y con bloques que representan los valores posicionales de la cantidad (Unidades, Decenas, Centenas, etc.) que se irán llenando poco a poco moviendo bit por bit

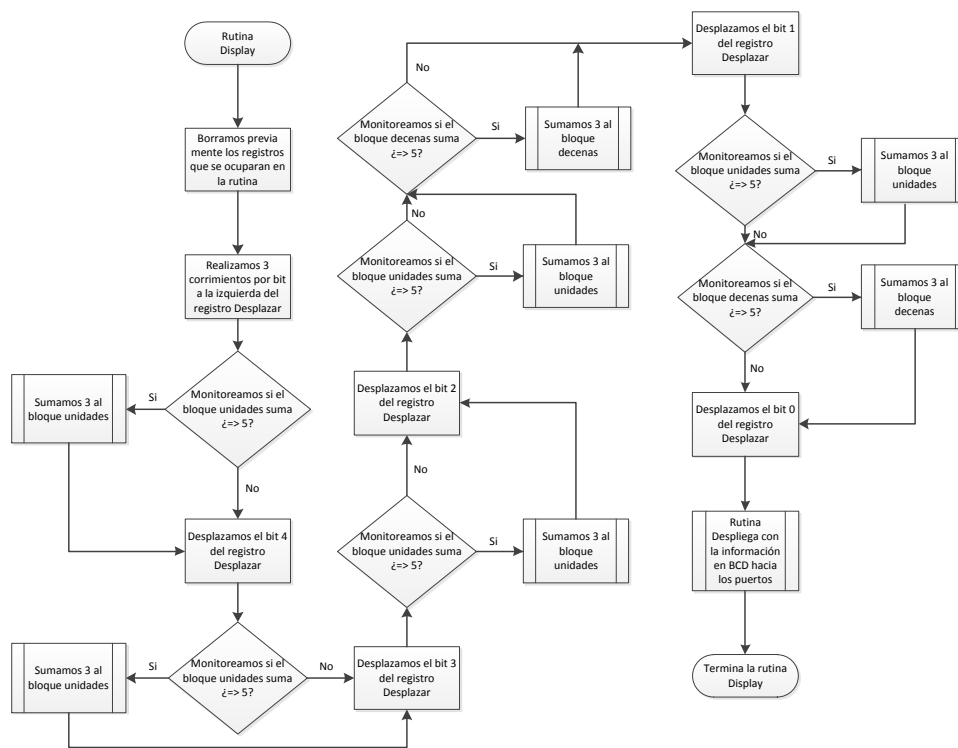


Figura 23. Diagrama de flujo de la rutina display.

hacia la izquierda de la cantidad hacia los bloques de los valores posicionales, se realizará una pausa cuando se detecte en cualquier bloque si el número que se encuentra ahí iguale o rebase la cantidad de cinco (5), si fuera así entonces se sumará en ese bloque el valor de tres (3), así continuaremos hasta mover todos los bits del número a mostrar.

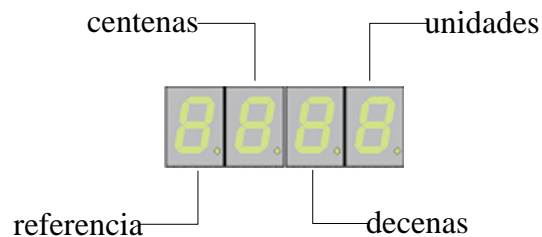


Figura 24. Relación de los 4 display's del sistema.

Operación	Centenas	Decenas	Unidades	Binario	Operación	Unidades de millar	Centenas	Decenas	Unidades	Binario
Decimal				104	Decimal					1023
Hexadecimal				68	Hexadecimal					3FF
Inicio (Binario)				01101000	Binario					1111111111
Corrimiento 1				1	Inicio					1111111111
Corrimiento 2				11	Corrimiento 1					1
Corrimiento 3				110	Corrimiento 2					11
Suma 3				1001	Corrimiento 3					111
Corrimiento 4				0011	Suma 3					1010
Corrimiento 5				0110	Corrimiento 4					0101
Suma 3				1001	Suma 3					1000
Corrimiento 6				0010	Corrimiento 5					11
Suma 3				1000	Corrimiento 6					110
Corrimiento 7				0100	Suma 3					1001
Termina	1	0	4	104	Corrimiento 7					0010
					Suma 3					0010
					Corrimiento 8					10
					Suma 3					10
					Corrimiento 9					101
					Suma 3					1000
					Corrimiento 10					0001
					Termina	1	0	2	3	0001
										0011
										3
										1023

Figura 25. Ejemplos del método de conversión de número binario al código BCD.

Para una mejor comprensión del método se muestra en la Figura 25, ejemplos de la conversión.

En la rutina de los display's primeramente la información que se desea mostrar se guarda en un registro general (Desplazar) para su manejo, después se irán desplazando bit por bit hacia los registros generales Dato_Displ_1 que representaran las unidades y decenas, y Dato_Displ_2 para las centenas esto se muestra en la Figura 26.

Una vez terminado el proceso, el número de cada bloque pasara a una rutina de activación/desactivación de los puertos asignados del microcontrolador que representaran

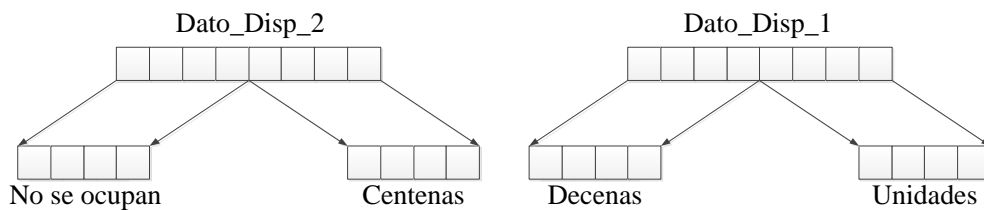


Figura 26. Distribución de los bloques en los registros Dato_Displ.

el número en código BCD, a su vez estos puertos enviaran la información a un decodificador para poder visualizar la cantidad en los display's.

4.5 CALIBRACION DE LOS SENSORES

La rutina de calibración de los sensores (denominada en el programa como "calibsens") se muestra en el siguiente diagrama de flujo donde se explica de forma general se funcionamiento (Figura 27).

En la rutina de calibración de los sensores (calibsens) en un inicio con ayuda del TMR1 se toma un tiempo de 53 segundos aproximadamente debido a que se espera la estabilidad de los sensores que sufren variaciones bruscas de conductividad al ser conectados a la alimentación por primera vez después de un tiempo de inactividad [5]. Estas variaciones se muestran en la Figura 28, donde se puede observar que durante el transcurso del tiempo el valor de la tensión (V_L) va estabilizándose hasta alcanzar un valor casi constante. Este comportamiento es similar en los 3 sensores.

Una vez que transcurre el tiempo (53 seg) para estabilizar los valores de los sensores tomamos la lectura de la conversión A/D del sensor delantero-izquierdo, delantero-derecho y trasero. En la Figura 29 se muestra la distribución de cada sensor con su canal correspondiente del convertidor A/D.

Una vez obtenidas las lecturas de los 3 sensores se guardan cada una en 2 registros generales (capacidad de 1 byte cada una) debido a que dichas lecturas tienen un tamaño de 10 bits que es el resultado de la conversión, estas lecturas pasan a una rutina de comparación bit por bit entre las 3 lecturas empezando por el bit más significativo hasta el menos significativo hasta determinar la lectura que obtuvo el mayor valor (valor de concentración de etanol) y tomarlo como parámetro para asignarlo a cada registro que representa los sensores del sistema (lectura de cada sensor en la subrutina calibración), la

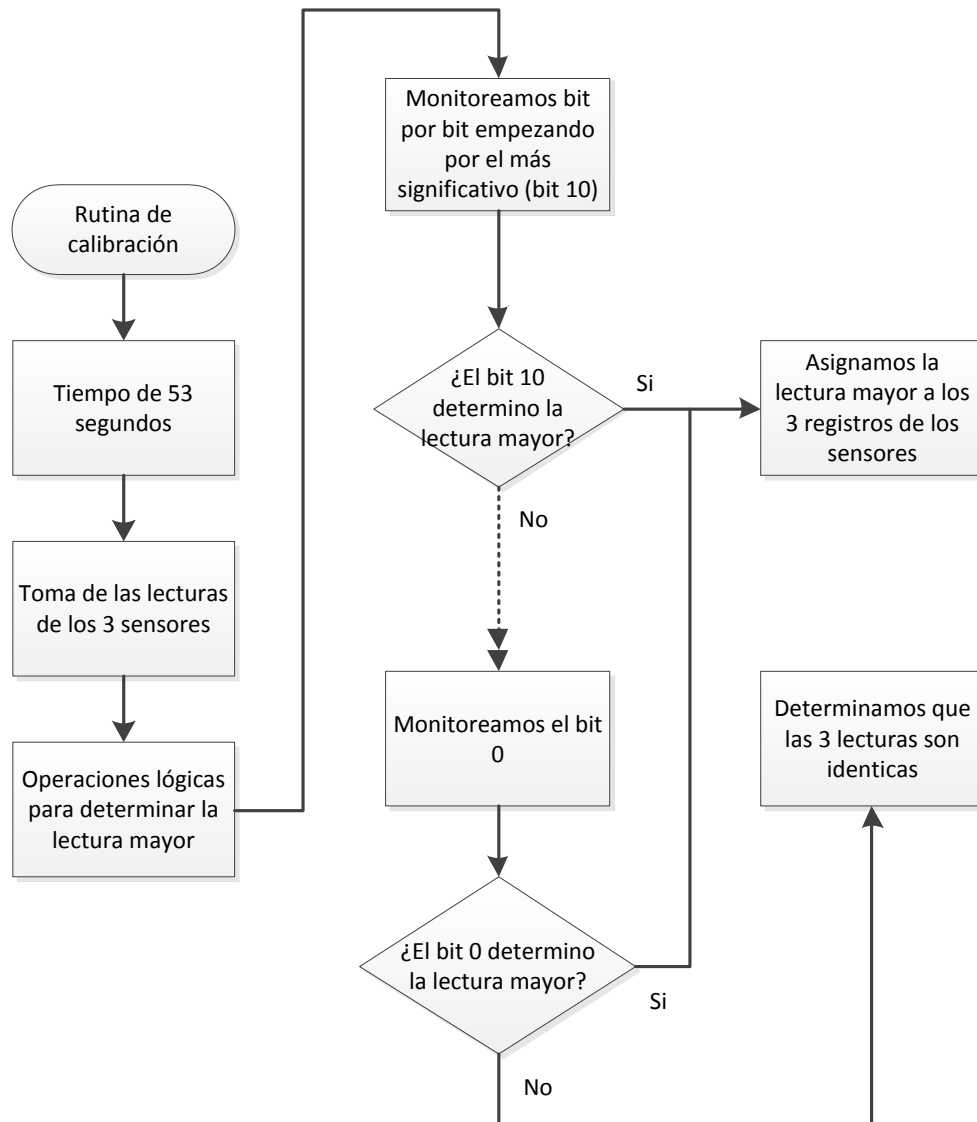


Figura 27. Diagrama de flujo de la rutina calibración (calibsens).

justificación de igualar las lecturas de los 3 sensores antes de entrar a las rutinas de toma de decisión es debido a que cada sensor presenta diferentes lecturas al final del tiempo de la calibración, es por ello que esta subrutina compensa los diferentes valores que presentan los 3 sensores del sistema asignándoles el mismo valor.

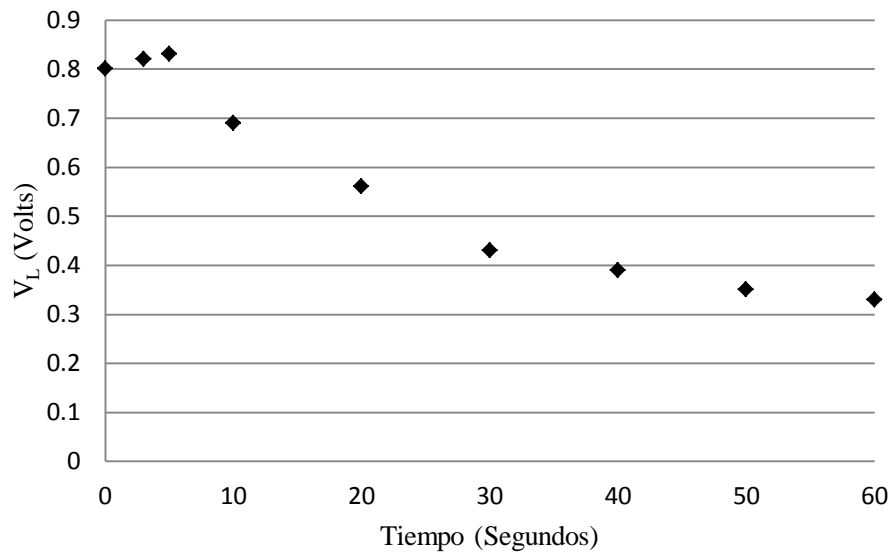


Figura 29. Estabilización de la salida del sensor al paso del tiempo.

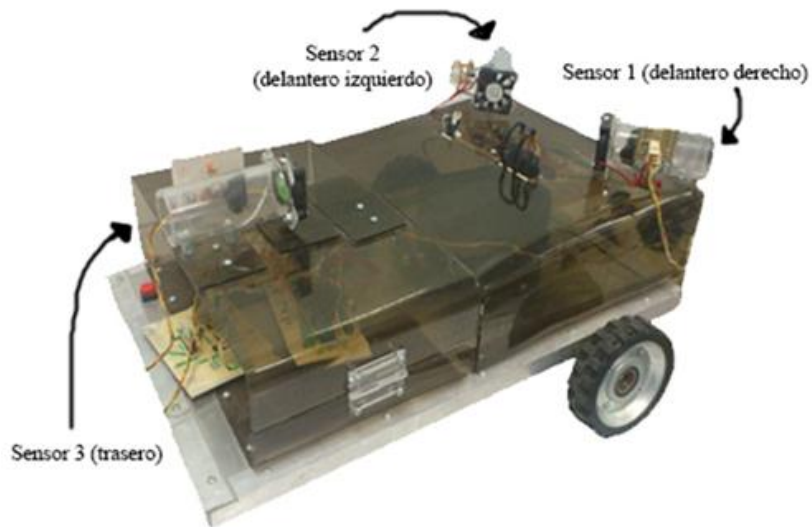


Figura 28. Distribución de los sensores en el sistema móvil.

4.6 RUTINA DE GIRO DE 180° (CLSATRAS)

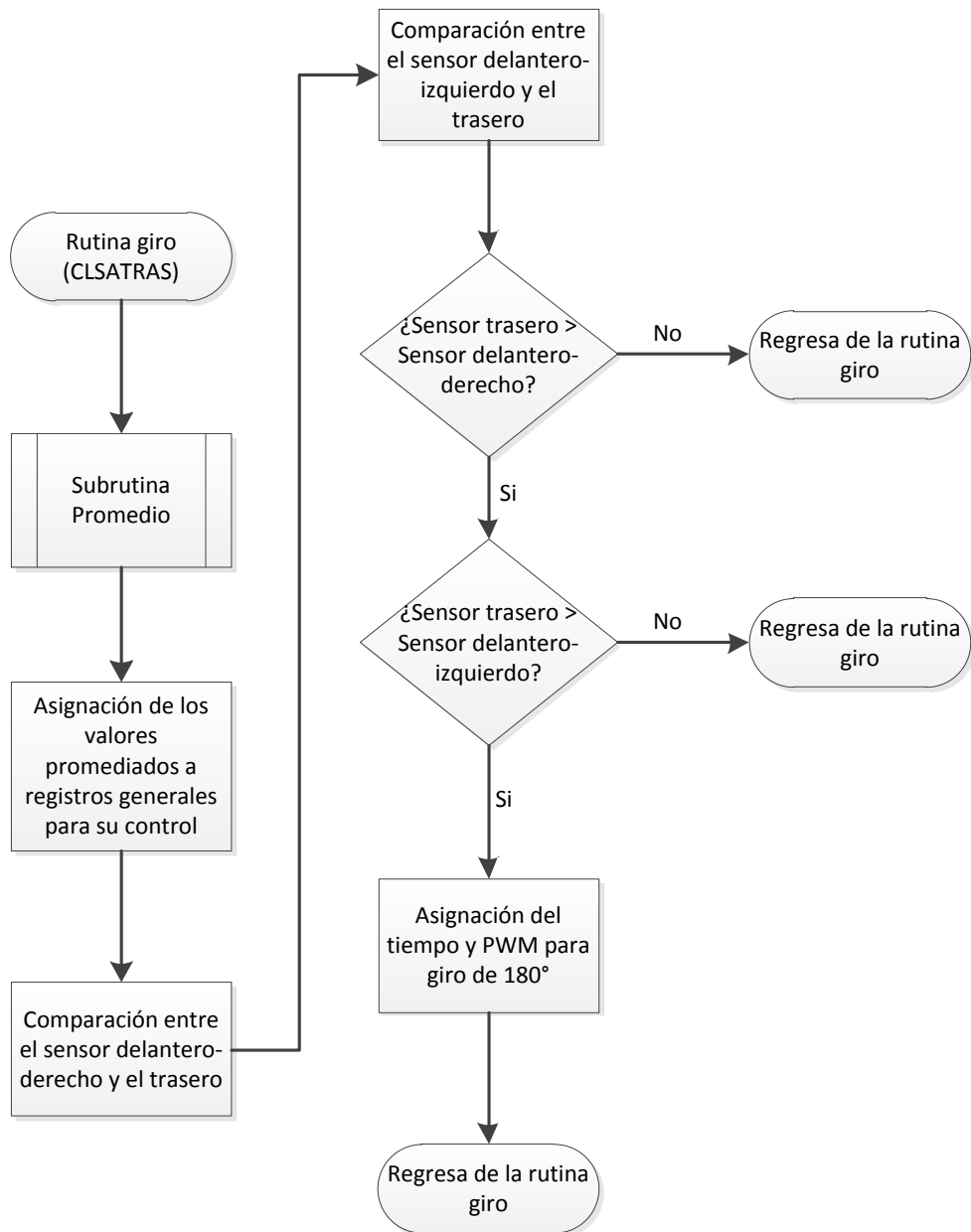


Figura 30. Rutina giro de 180° del sistema.

La descripción de la subrutina CLSATRAS se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 30, ahí se muestra el programa de la toma de decisión para girar el sistema 180° grados, una vez que se comprueba que el sensor trasero ha obtenido la lectura de mayor valor.

En la sección 4.3 se menciona que durante el programa principal es necesario entrar a esta rutina ya que se encuentra en ella la rutina “Promedio”, pero antes de explicarla es necesario mencionar que se necesita saltar a la página 1 de la memoria de programa ya que el código que hasta ahora se ha mencionado sobrepasa la página 0 de la memoria de programa lo que es necesario realizar por software, esto se realiza con el apoyo del registro específico PCLATH (sección 2.3.3), ya en la rutina “Promedio” lo que se hace es tomar las lecturas de cada sensor empezando por el del canal RA0/AN0. Posteriormente la lectura es enviada a una rutina de sustitución en la ecuación de caracterización del sensor (sección 3.1), una vez sustituida pasamos la rutina de suma con el valor de la calibración y así se obtiene el primer valor correspondiente al sensor del canal RA0/AN0 (Sensor delantero-derecho). Siguiendo con la rutina se hace el mismo proceso con los sensores restantes (RA1/AN1 y RA2/AN2).

Una vez terminada la captura, sustitución y suma con la calibración, se realizara todo este proceso 16 veces con una duración de 1 segundo aproximadamente entre cada toma, se eligió este número ya que entre cada toma de decisión existe una pausa de 14 segundos (Figura 22) para esperar la estabilización de los sensores. Así, se redondea la espera a 30 segundos por cada toma de decisión. Por lo tanto definimos que todo el proceso de las 16 tomas dura 16 segundos. Terminadas las tomas se realiza un promedio de las mismas para obtener una sola lectura por cada sensor e iniciar la comparación entre cada sensor empezando con el sensor delantero-derecho y el sensor trasero y después con el sensor delantero-izquierdo y el sensor trasero.

Terminando la comparación pasamos a la decisión de girar el móvil 180° ó regresar de la subrutina “CLSATRAS” al programa principal. Si en cualquier caso de la

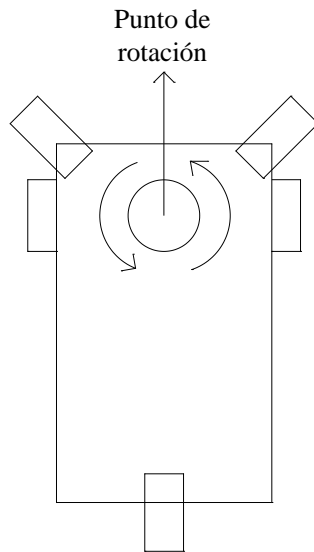


Figura 31. Punto de rotación.

comparación fuera mayor la respuesta del sensor trasero, iniciaríamos la activación del PWM con el valor necesario de tiempo y ancho de pulso para que el sistema gire en sentido en contra de las manecillas del reloj teniendo como eje la parte media-delantera como lo muestra la Figura 31.

Pero si fuera mayor la respuesta del sensor delantero-derecho o el sensor delantero-izquierdo con respecto al sensor trasero entonces solo regresaríamos de la subrutina sin activar ningún módulo de PWM pero con el beneficio de tener los valores promediados de cada sensor.

4.7 RUTINA ADELANTE (CLSADELANTE)

La descripción de la subrutina CLSADELANTE se muestra en el siguiente diagrama de flujo (Figura 32), ahí se muestra la rutina de la toma de decisión para

desplazar el sistema hacia la izquierda o derecha aproximadamente 45°, una vez que se comprueba que el sensor izquierdo o derecho ha obtenido la lectura de mayor valor.

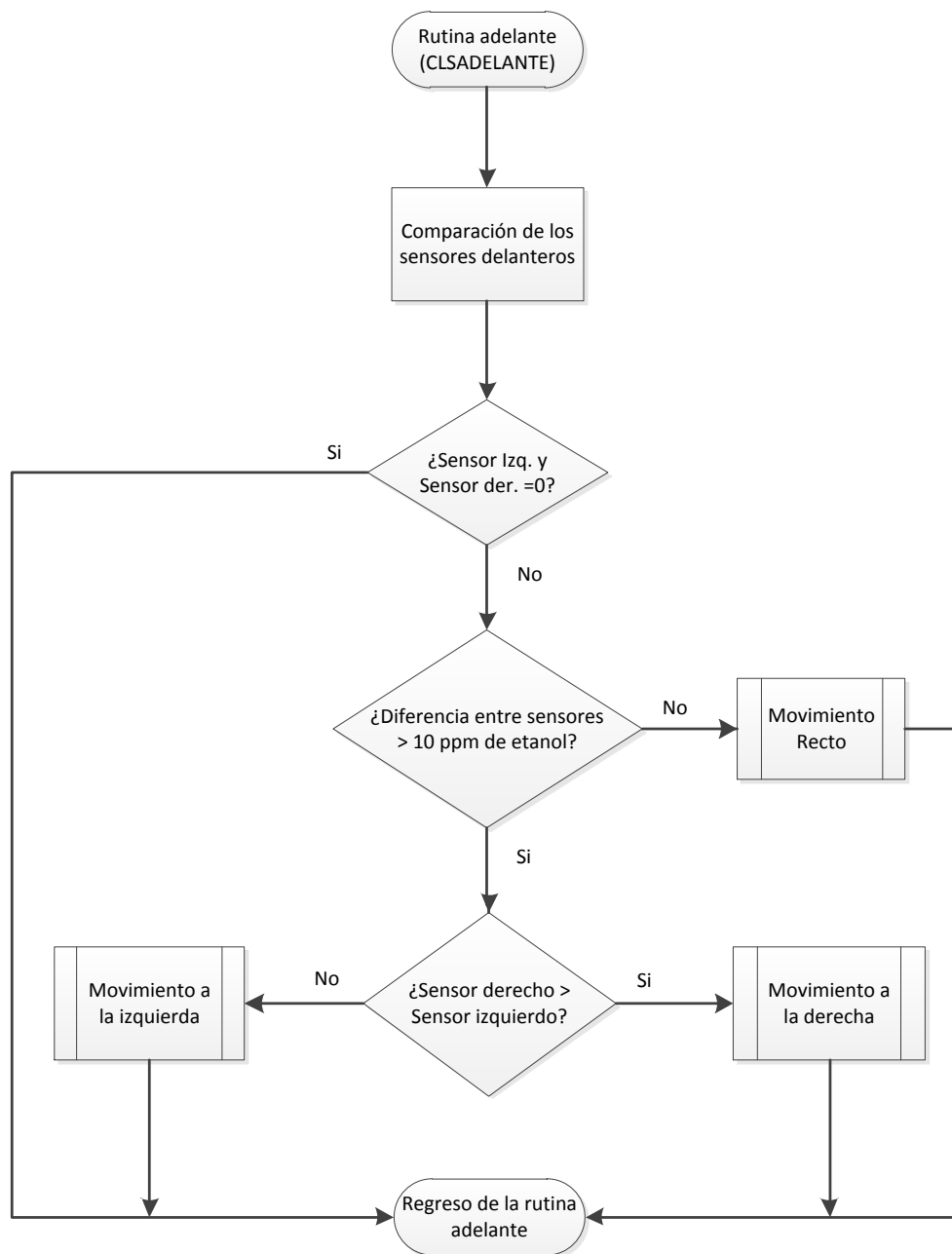


Figura 32. Rutina adelante (CLSADELANTE).

En esta parte del programa se cuenta con las lecturas calibradas y evaluadas en la ecuación de los 3 sensores, en la parte inicial de esta rutina se inicia con la comparación solo de los sensores delanteros (a través de la subrutina “compara”).

Una vez que se tiene el resultado de la comparación de los 2 sensores entramos a una etapa de decisión donde si los 2 sensores tuvieron exactamente igual su lectura nos disponemos a regresar de la subrutina al programa principal sin tomar ninguna decisión de avance del sistema. La justificación de esta decisión es debido a que la lectura de los 2 sensores resultarían con valor de cero en su comparación (deduciendo que los dos valgan cero) implicando que la fuente de olor se encuentra en la parte trasera del sistema y se tomaría una mala decisión el avanzar hacia adelante, izquierda o derecha lo cual involucraría alejarnos más de la fuente de olor, es por ello que elegimos el no tomar ninguna decisión y regresar de la subrutina CLSADELANTE esperando a la siguiente toma de lecturas de los 3 sensores nuevamente.

Si no fuera el caso en que el resultado de la comparación fuera cero entre los dos sensores continuaremos con el código para otra toma de decisión, que consiste en que si el resultado de la comparación arroja una diferencia máxima de 10 ppm de concentración de etanol del promedio de las 16 tomas de lectura, pasara a una subrutina llamada “Recto” para avanzar en forma directa hacia la fuente de olor. Una vez dentro de esta subrutina se activan los módulos CCPXCON (sección 2.3.6) encargados de generar el PWM, del cual configuramos el ancho de pulso de tal manera que los motores revolucionen a la misma velocidad con un tiempo de 2 segundos para obtener un desplazamiento aproximadamente de 1 metro de longitud. En esta misma subrutina se manda a mostrar en los display’s la información de concentración de etanol (promediada de los 2 sensores) detectada en esa área, y que es mostrada en los 3 primeros display’s. El 4° display indicará (con el número 4) que el programa entro en la subrutina “Recto”. Terminado el desplazamiento regresamos de la subrutina para culminar la rutina “CLSADELANTE” y continuar con el programa principal para la siguiente toma de decisión.

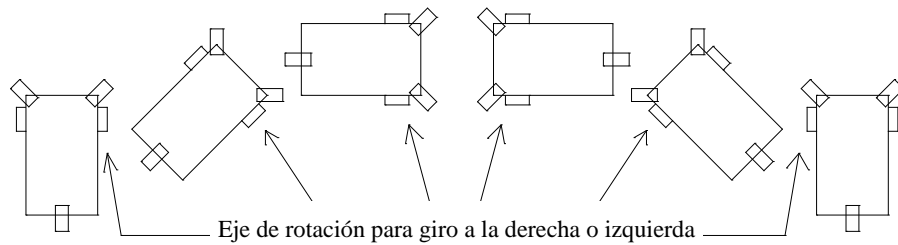


Figura 33. Giro de 90° a la derecha o izquierda.

Si el caso de la comparación de los 2 sensores sobrepasara las 10 unidades de concentración de etanol del promedio de las 16 tomas de lectura, entonces entraríamos a una de las subrutinas llamadas “loopclsderecha” y “loopclsizquierda” para girar el sistema hacia la derecha o izquierda respectivamente con una aproximación de giro de 90° teniendo como eje de rotación la llanta que no tendrá movimiento del sistema como se observa en la Figura 33.

Para realizar este movimiento estando en cualquiera de las 2 subrutinas mencionadas, se activaran los módulos encargados del PWM pero solo activando uno de los motores y el tiempo necesario (aproximadamente 1 segundo) para cumplir los 90° de giro. De igual manera que en la subrutina anterior se mostrará en los 3 primeros display's la información de concentración de etanol detectada en esa área (en este caso el sensor de mayor valor obtenido) y el 4° display indicará con el número 1 el giro a la derecha (loopclsderecha) y con el número 2 el giro a la izquierda (loopclsizquierda). Al terminar el desplazamiento regresamos de la subrutina para culminar la rutina “CLSADELANTE” y continuar con el programa principal para la siguiente toma de decisión.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPACIOS EXPERIMENTALES

El sistema se sometió a diferentes pruebas para medir su eficacia para encontrar la fuente de olor siendo esta de 200 ml de etanol contenida en un recipiente (plato extendido), situada delante de un tubo de cartón de 50 cm. de longitud y 30 cm. de diámetro el cual simula un túnel de viento proporcionado por un ventilador de 16 pulgadas de diámetro, nos apoyamos en el ventilador para contrarrestar los vientos ocasionados por la intemperie y así generar una estela de olor hacia el sistema.

Las pruebas se realizaron en 2 espacios diferentes cuya principal diferencia fue que

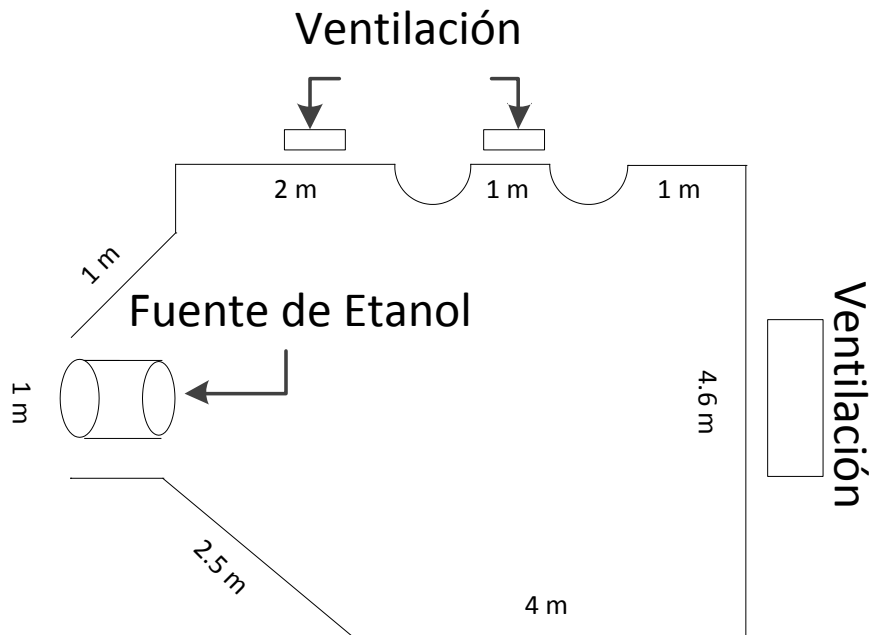


Figura 34. Croquis del espacio cerrado.

uno se encontraba al aire libre y el otro en un espacio cerrado con ciertas zonas de ventilación para no saturar el espacio de la fuente de olor (etanol).

El espacio cerrado (bajo techo) donde se realizaron las primeras pruebas tiene dimensiones de 21 m^2 ($3 \times 7 \text{ m}$ aproximadamente) y posteriormente se realizaron otras pruebas en un espacio abierto con dimensiones de 28 m^2 ($4 \times 7 \text{ m}$ aproximadamente). Estos espacios se muestran en forma de croquis en las Figuras 34 y 35 respectivamente.

Al encender el sistema esperamos 1 minuto para la calibración de los sensores. Durante este tiempo en los display's mostrara el mensaje de "1234" solo para informar al usuario que el sistema inició correctamente, al término de este tiempo los display's mostrarán el valor de la calibración de los 3 sensores en los 3 primeros display's y en el cuarto mostrará el número 0 solo para referencia para el usuario que el valor mostrado se refiere a la calibración. Esta información se mostrara durante 30 segundos (Donde 14 segundos se utilizan para la estabilidad de la lectura de los sensores y 16 segundos se utilizan para la toma de la lectura de los sensores en cada segundo siendo 16 tomas de cada sensor para el promedio, esto se menciona con más detalle en la sección 4.6 y 4.7). Una vez transcurrido este tiempo se realiza la primera toma de decisión del sistema mostrando en

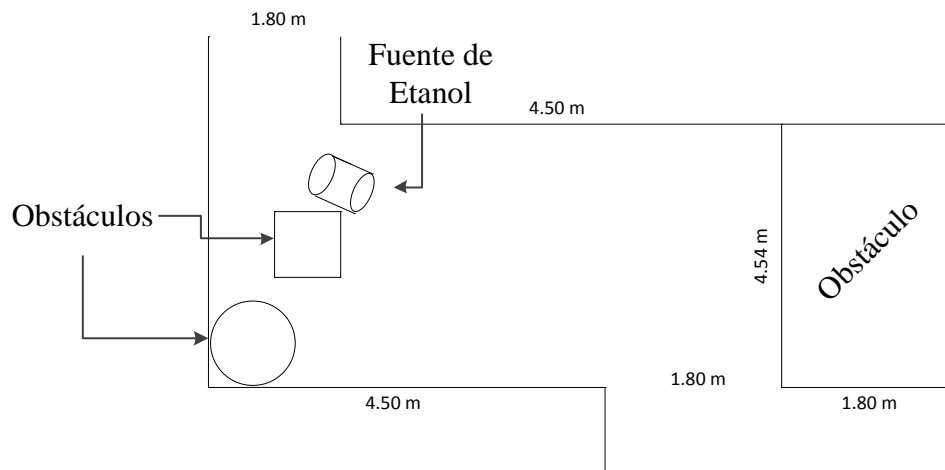


Figura 35. Croquis del espacio abierto.

los 3 primeros display's la mayor lectura promediada de concentración de etanol y en el cuarto display el número del sensor (sección 4.5) que obtuvo la mayor lectura. Esta información se mostrará durante 30 segundos en espera de la próxima toma de decisión del sistema y así continuará el sistema para encontrar la fuente de olor.

5.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL ESPACIO CERRADO.

En la Figura 36 se observa una prueba en el espacio cerrado mostrando el trayecto que realizó el sistema para encontrar la fuente olor en dicho espacio.

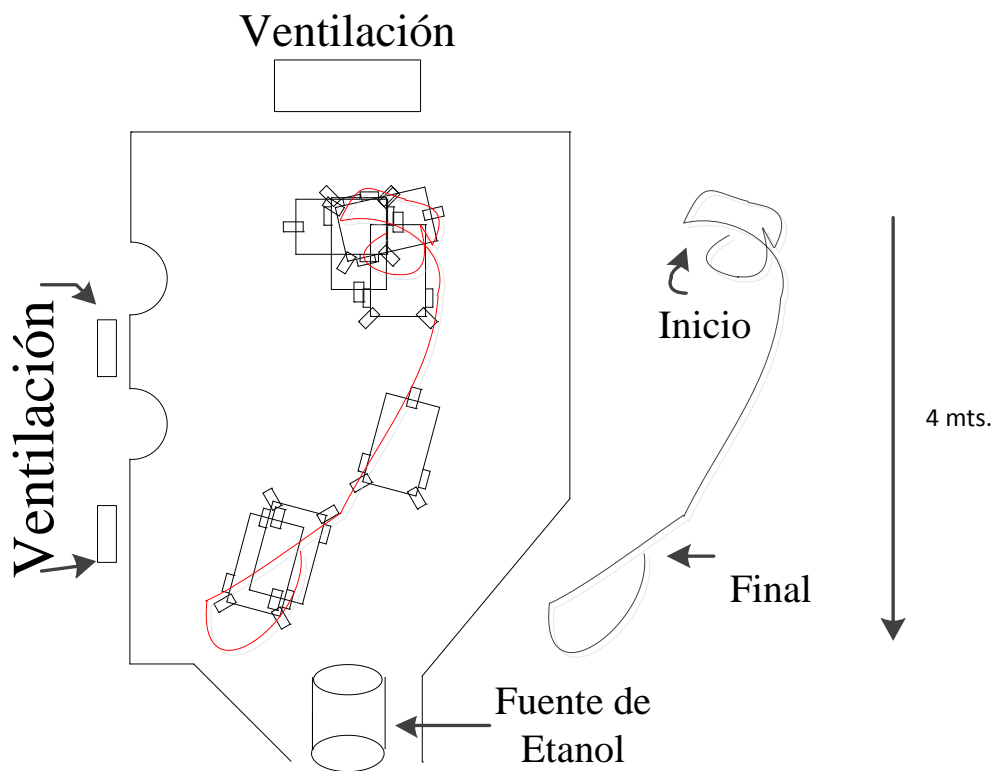


Figura 36. Prueba en espacio cerrado.

Tabla 5. Desviaciones que realizo el sistema durante la prueba en el espacio cerrado.

Toma	Sensor (Toma de decisión)	Sensor (Decisión esperada)	Distancia
2 ^a .	3 (Giro)	2 (Izquierda)	4 m
6 ^a .	3 (Giro)	2 (Izquierda)	1 m

El desplazamiento se realizó en una distancia de separación de 4 m entre el sistema y la fuente de olor, se realizaron 6 tomas de decisión de parte del sistema para encontrar la fuente y se requirió 4 minutos con 13 segundos de tiempo desde el momento de encender el sistema hasta que alcanzó el objetivo, tomando en cuenta el 1 minuto con 30 segundos de tiempo que se necesitó para la calibración de los sensores. Por lo tanto el tiempo efectivo desde la 1^a toma de decisión hasta la última toma de decisión fue de 2 minutos con 43 segundos de tiempo efectivo.

En la prueba el sistema tuvo desviaciones en su trayectoria (malas decisiones) hacia la fuente de olor, siendo 2 malas decisiones que tomo en su recorrido, a pesar de ello el sistema corrigió el rumbo para reincorporarse a la estela de olor de la fuente, estas malas decisiones se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 6. Resultados de las tomas obtenidas de la prueba en el espacio cerrado.

Muestra	Concentración de etanol	Sensor	Distancia
Calibración	23 ppm	Todos (0)	4 m
1 ^a . Toma	97 ppm	3 (Giro)	4 m
2 ^a . Toma	67 ppm	3 (Giro)	4 m
3 ^a . Toma	121 ppm	1 (Derecha)	3.75 m
4 ^a . Toma	100 ppm	4 (Recto)	2.5 m
5 ^a . Toma	162 ppm	4 (Recto)	1.25 m
6 ^a . Toma	109 ppm	3 (Giro)	1 m

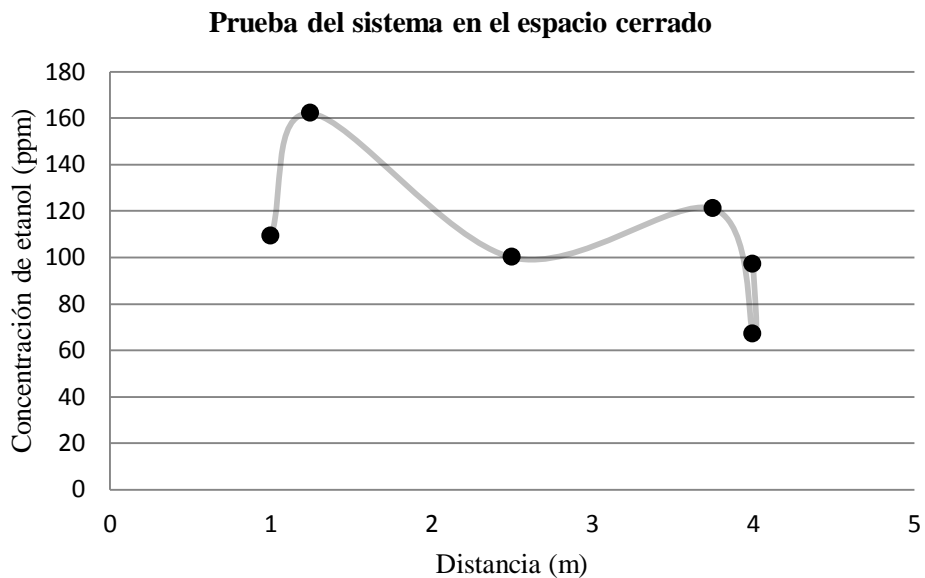


Figura 37. Concentración de etanol en las diferentes distancias en el espacio cerrado.

En la Tabla 6 se muestra el valor calibrado y las lecturas de concentración que se fueron obteniendo del sensor que obtuvo el mayor valor promediado de las 16 muestras en cada desplazamiento que se realizó durante la prueba en el espacio cerrado.

Los valores obtenidos nos indican una tendencia de crecimiento en la concentración de etanol en la detección de cada sensor conforme se va acercando a la fuente de olor (Figura 37).

Se decidió culminar la prueba en la sexta toma de decisión debido a que el sistema por la cercanía de la fuente de olor y la ventilación que se encontraba cerca del mismo hacia que el sistema realizara movimientos en esa área sin mostrar algún avance para acercarse o alejarse de la fuente de olor.

5.3 PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL ESPACIO ABIERTO.

En la Figura 38 se observa la prueba que se realizó en el espacio abierto mostrando el trayecto que realizó el sistema para encontrar la fuente olor en dicho espacio. Como se observa el desplazamiento efectivo fue de 4 m, desde de su ubicación inicial hasta la fuente de olor. En la misma figura se dibujó una silueta de los movimientos que realizó el sistema

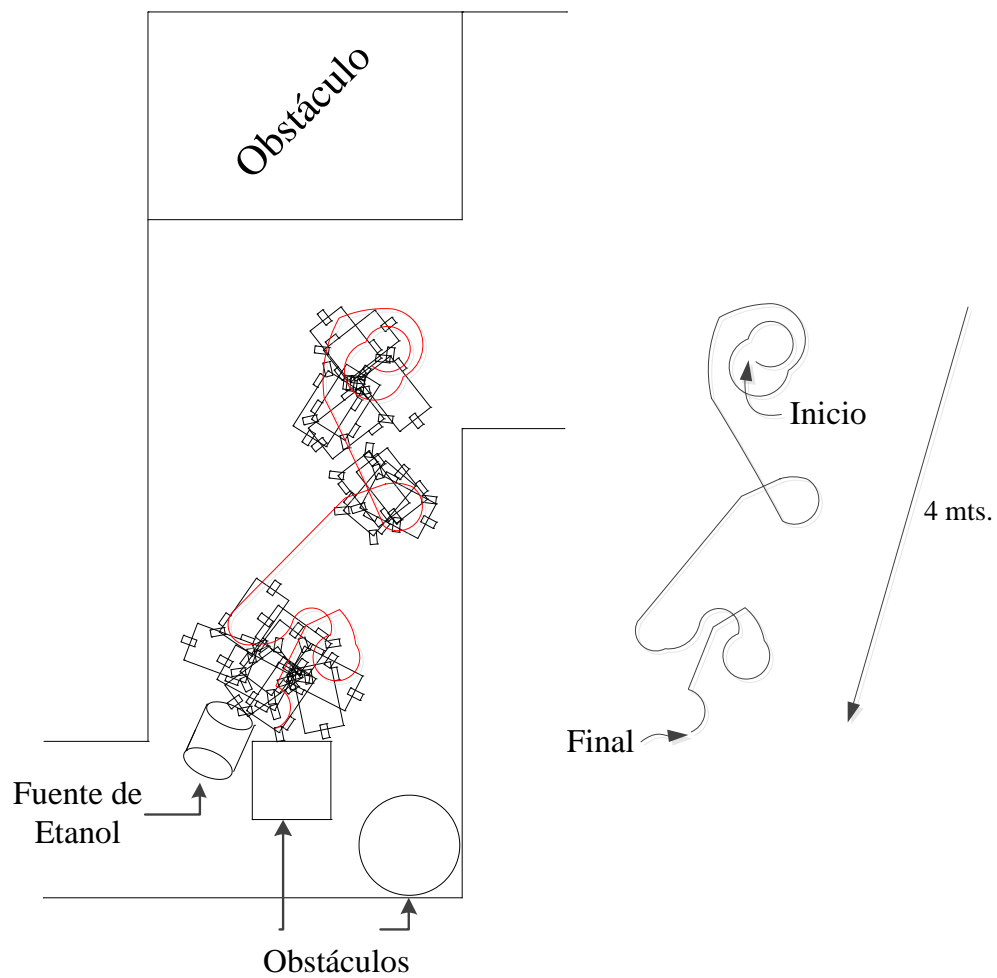


Figura 38. Prueba en espacio abierto.

en todas las tomas de decisión que realizó.

El desplazamiento se realizó en una distancia de separación de 4 m entre el sistema y la fuente de olor. Se realizaron 18 tomas de decisión de parte del sistema para encontrar la fuente y se requirió 11 minutos con 1 segundo de tiempo desde el momento de encender el sistema hasta que alcanzó el objetivo, tomando en cuenta el 1 minuto con 30 segundos de tiempo que se necesitó para la calibración de los sensores. Por lo tanto el tiempo que se requirió desde la 1ª toma de decisión hasta la última toma de decisión fue de 9 minutos con 31 segundos de tiempo efectivo.

De igual manera que en la prueba en el espacio cerrado, en esta prueba existieron desviaciones del sistema en su trayectoria (malas decisiones) hacia la fuente de olor, siendo en este caso 4 malas decisiones que tomo en su recorrido, a pesar de ello el sistema corrigió el rumbo para reincorporarse a la estela de olor de la fuente, estas malas decisiones se pueden observar en la Tabla 7.

En la Tabla 8 se muestra el valor calibrado y las lecturas de concentración que se fueron obteniendo del sensor que tuvo el mayor valor promediado de las 16 muestras en cada desplazamiento que se realizó durante la prueba en el espacio abierto. De igual manera que en la prueba en el espacio cerrado los valores obtenidos nos indican una tendencia de crecimiento en la concentración de etanol en la detección de cada sensor

Tabla 7. Desviaciones que realizo el sistema durante la prueba en el espacio abierto.

Toma	Sensor (Toma de decisión)	Sensor (Decisión esperada)	Distancia
2ª.	3 (Giro)	4 (Recto)	4 m
12ª.	2 (Izquierda)	1 (Derecha)	0.5 m
13ª.	1 (Derecha)	3 (Giro)	0.75 m
17ª.	2 (Izquierda)	4 (Recto)	0.3 m

Tabla 8. Resultados de las tomas obtenidas de la prueba en el espacio abierto.

Muestra	Concentración de etanol	Sensor	Distancia
Calibración	15 ppm	Todos (0)	4 m
1ª. Toma	49 ppm	3 (Giro)	4 m
2ª. Toma	43 ppm	3 (Giro)	4 m
3ª. Toma	72 ppm	2 (Izquierda)	4 m
4ª. Toma	80 ppm	2 (Izquierda)	4 m
5ª. Toma	102 ppm	2 (Izquierda)	3.75 m
6ª. Toma	70 ppm	4 (Recto)	3 m
7ª. Toma	64 ppm	3 (Giro)	2.75 m
8ª. Toma	69 ppm	2 (Izquierda)	3 m
9ª. Toma	93 ppm	2 (Izquierda)	3 m
10ª. Toma	104 ppm	4 (Recto)	1 m
11ª. Toma	128 ppm	2 (Izquierda)	0.75 m
12ª. Toma	192 ppm	2 (Izquierda)	0.5 m
13ª. Toma	206 ppm	1 (Derecha)	0.75 m
14ª. Toma	138 ppm	3 (Giro)	0.5 m
15ª. Toma	198 ppm	2 (Izquierda)	0.75 m
16ª. Toma	224 ppm	2 (Izquierda)	0.5 m
17ª. Toma	240 ppm	2 (Izquierda)	0.3 m
18ª. Toma	229 ppm	1 (Derecha)	0.1 m

conforme se va acercando a la fuente de olor (Figura 39).

Se decidió culminar la prueba en la decimoctava toma de decisión debido a que se encontraba el sistema muy próximo a la fuente de olor y un obstáculo impedía que el mismo pudiera realizar más movimientos.

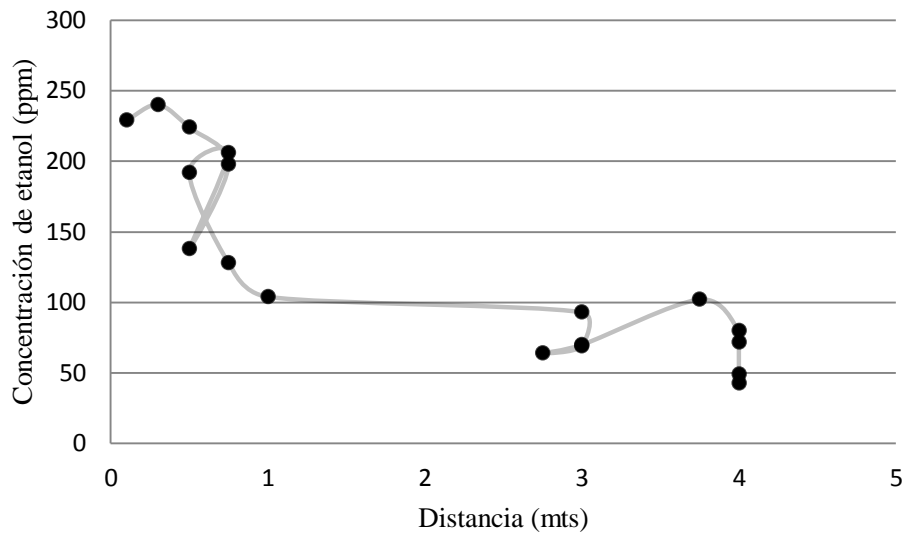


Figura 39. Concentración de etanol en las diferentes distancias en el espacio abierto.

5.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE AMBOS ESPACIOS.

Se realizaron varias pruebas en ambos espacios (abierto y cerrado) con una distancia de separación de 4 m a 5 m, donde se obtuvieron diferentes resultados tanto en las lecturas de concentración de etanol, tiempo para acercarse a la fuente de olor y en los desplazamientos del sistema. Podemos decir que esto fue el resultado por los cambios de dirección del viento en el espacio abierto y la saturación de olor en el espacio cerrado como factores principales en ambos casos, a pesar de ello el sistema siempre corregía su dirección cuando se alejaba de la fuente de olor.

En la Tabla 9 se muestran los datos que se obtuvieron de 5 pruebas exitosas realizadas (3 pruebas en el espacio cerrado y 2 pruebas en el espacio abierto). En ella se observa que en el espacio cerrado se llevó menos tomas de decisión el sistema para acercarse a la fuente de olor pero la mínima distancia de acercamiento (1 m aproximadamente) fue mayor en comparación con las pruebas realizadas en el espacio

abierto, donde prácticamente se tocó el recipiente de la fuente de olor. Sin embargo las tomas de decisión para el espacio abierto fueron prácticamente el doble comparadas con las

Tabla 9. Datos obtenidos de 5 pruebas realizadas por el sistema.

Espacio cerrado						Espacio abierto			
1ª. Prueba		2ª. Prueba		3ª. Prueba		1ª. Prueba		2ª. Prueba	
Distancia (m)	ppm	Distancia (m)	ppm	Distancia (m)	ppm	Distancia (m)	ppm	Distancia (m)	ppm
4	97	4	114	5	34	4	49	4	40
4	67	3	117	5	22	4	43	4	59
3.75	121	2.75	136	5	79	4	72	4	75
2.5	100	2	163	4.25	44	4	80	3	89
1.25	162	1.75	170	3.25	106	3.75	102	2.75	107
1	109	1	195	2	93	3	70	2.75	114
		1	78	1.75	102	2.75	64	3.75	98
				1.5	150	3	69	3.75	52
				1.25	172	3	93	3.75	24
				1	159	1	104	3.75	62
				0.75	189	0.75	128	3.75	44
						0.5	192	2.5	73
						0.75	206	2	113
						0.5	138	2	120
						0.75	198	1.5	123
						0.5	224	1.25	144
						0.3	240	1.5	152
						0.1	229	1.25	92
								1.25	168
								1	193
								0.5	208

pruebas en el espacio cerrado.

En cada prueba se observan los diferentes desplazamientos que realizó el sistema para acercarse a la fuente de olor, en todos estos desplazamiento el sistema toma algunas malas decisiones que hacen que se aleje de la fuente de olor, debido a los cambios de concentración de etanol en ese lugar (saturación del olor en el espacio cerrado y a los cambios de dirección del viento en el espacio abierto) a pesar de ello el sistema retoma la dirección de la estela de olor proporcionada por la fuente y se puede proponer que las diferentes trayectorias que realiza el sistema es debido a los cambios ambientales que existen en los lugares donde se realizaron las pruebas, la comparación de estos desplazamientos se pueden observar en la Figura 40.

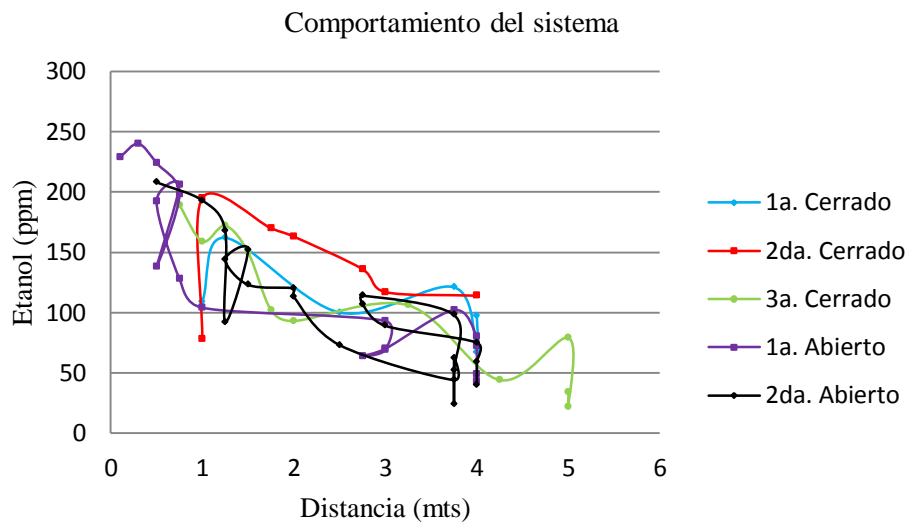


Figura 40. Comparación de las diferentes pruebas realizadas.

5.5 COMPARACION CON EL SISTEMA ANTERIOR.

En las pruebas realizadas con el sistema anterior se utilizó 50 ml de alcohol etílico contenida en un recipiente colocada delante de un ventilador como se realizó con nuestro sistema pero con 200 ml de etanol, los experimentos con el sistema anterior se realizaron en un espacio de 10x5 m bajo techo con 3 muros el cual se puede considerar como un espacio semi-cerrado. Para la toma de la lectura de los sensores solo se consideró 8 bits de la conversión analógica-digital (siendo los más significativos de la conversión) a diferencia del sistema actual que se considera 10 bits de la conversión, el valor máximo en términos de concentración que se detectó de parte de los sensores del sistema anterior fue de 700 ppm (este valor de concentración fue calculado por parte de diseñador debido que las lecturas de los sensores que tomaban la decisión del sistema eran directamente de la voltaje analógico del sensor sin ser evaluada en concentración de etanol).

En la primera prueba el sistema partió de una posición ubicada aproximadamente 7 m de la fuente de olor, durante la prueba se necesitaron 17 movimientos de aproximadamente 14 segundos cada uno obteniéndose un tiempo total de 3 minutos 58 segundos para localizar la fuente de olor. En la segunda prueba de igual manera se ubicó a una distancia de 7 m de la fuente de olor, el cual el sistema tuvo que realizar 16 movimientos para localizar la fuente tomando un tiempo total de 3 minutos 44 segundos. A diferencia con el sistema optimizado que se requirió de 7 movimientos con un tiempo de 2 minutos 43 segundos para localizar la fuente de olor en un espacio cerrado y en la prueba en un espacio cerrado se requirió de 18 movimientos con un tiempo fue de 9 minutos 31 segundos.

Después de realizar las pruebas el sistema anterior se acercó a menos de 30 cm de la fuente de olor en 4 de 6 experimentos manteniéndose dentro de la traza de gas, en las pruebas donde no se tuvo éxito se cree que el espacio circundante estaba saturado de gas y eso alteraba las lecturas de los sensores, con el sistema optimizado encontró la fuente de olor en 3 de cada 5 pruebas, en las pruebas en el espacio cerrado el sistema de acercó a la

fuente de olor a 1 m mientras que en las pruebas en el espacio abierto se acercó hasta tocar prácticamente el recipiente de la fuente de etanol, de igual manera que en el sistema anterior se cree que el sistema optimizado en las pruebas que no tuvieron éxito fue debido que los espacios donde se realizaron las pruebas ya se encontraban saturados de gas afectando las lecturas de los sensores.

En la Tabla 10, se muestra las diferencias de los sistemas empleados tanto en implementaciones como en las pruebas realizadas.

Tabla 10. Comparación de los 2 sistemas.

ASPECTOS A COMPARAR	SISTEMA ANTERIOR	SISTEMA OPTIMIZADO
Resolución de la conversión A/D de los sensores	8 bits	10 bits
Evaluación de la lectura del sensor en concentración de etanol (ppm)	No	Si
Acondicionamiento de la señal para el rango completo de conversión A/D (0V a 2.5V)	No	Si
Resolución de la conversión A/D	4.8 mV	2.4 mV
Concentración mayor de etanol en ppm detectada por el sistema durante la prueba (espacio cerrado)	700	162
Localización de la fuga en el espacio cerrado (Tiempo)	224 segundos	163 segundos
Tipos de desplazamiento que presenta el sistema	1 movimiento tipo zigzagante	3 movimientos tipo angular (90°), rotacional (180°) y recto
Tiempo tomado por el sistema entre cada lectura del sensor (para no saturar el sensor)	30 seg.	14 seg.
Tipo de lectura del sensor para la toma de decisión del sistema	Voltaje obtenido en el sensor en el instante de finalizar el tiempo de pausa	Lectura promediada durante 16 tomas de cada segundo cada una, culminado el tiempo de pausa

CONCLUSIONES

Se realizó el mejoramiento de un sistema móvil para la detección de fugas de gas implementando un circuito para acondicionar la señal del sensor de gas comercial FIGARO TGS2620. Por medio del acondicionamiento de la señal se logró ampliar el rango de operación del sensor en un rango de 0 V a 2.5 V que abarca la conversión analógica-digital de 10 bits para un rango de concentración de 0 a 7000 ppm de Etanol. Por lo tanto, reduciendo el voltaje de referencia se pudo utilizar la lectura directa del sensor sin necesidad de otras etapas de acondicionamiento de señal.

Por otro lado, se comprobó la reproducibilidad del sensor y se encontró que es muy alta, por lo que se puede decir que las lecturas son bastante confiables. Además, se dedujo la expresión del comportamiento de la respuesta del sensor en concentración en función de la lectura digital, la cual posteriormente fue incorporada en el programa del microcontrolador.

En las pruebas realizadas se observó que a pesar de haberse realizado en dos lugares diferentes (espacio cerrado y espacio abierto) el sistema encontró la fuente de olor en 3 de cada 5 pruebas realizadas con condiciones apropiadas de la velocidad del viento (Brisa ligera artículo descriptivo en base a la escala de Beaufort [12]), el sistema obtuvo una diferencia en el tiempo para encontrar la fuente de etanol siendo en el espacio cerrado un menor tiempo para encontrarlo pero ocasiono que el sistema se acercara menos a la fuente en contraparte con las pruebas en el espacio abierto en donde le llevó más tiempo en encontrar la fuente de olor pero se tuvo un acercamiento mayor hacia la fuente. Se puede proponer un acondicionamiento del ambiente (viento constante) como de igual forma con la estela de olor (uniforme) para futuras pruebas que se realicen con el sistema, para definir los resultados obtenidos con condiciones de prueba determinadas.

El sistema requirió para encontrar la fuente de olor 4 minutos con 13 segundos de tiempo desde el momento de encenderlo hasta que alcanzó el objetivo en el espacio

cerrado, con respecto al espacio abierto requirió 11 minutos con 1 segundo en el momento de encender el sistema hasta que alcanzó el objetivo, en ambas pruebas el sistema tuvo desviaciones en su trayectoria (malas decisiones) hacia la fuente de olor, siendo 2 malas decisiones en el espacio cerrado y 4 en el espacio abierto, pero a pesar de ello el sistema siempre corrigió el rumbo para reincorporarse a la estela de olor de la fuente.

Como trabajo a futuro se puede proponer el enviar la información a una computadora vía comunicación inalámbrica de la concentración que van detectando los sensores en cada toma de decisión del sistema para llevar un registro del comportamiento de la estela de olor en las diferentes áreas del espacio de trabajo.

También se pueden proponer otros aditamentos en el sistema como sensores de proximidad para detectar objetos y poderlos evadir en el momento de la búsqueda de la fuente de olor por parte del sistema.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] P Balcells José, Romeral José Luis, AUTÓMATAS PROGRAMABLES, Editorial Alfaomega Marcombo, 1995
- [2] http://www.figaro.co.jp/en/data/pdf/20091110165158_19.pdf
- [3] Angulo Usategui Jose Ma., Romero Yesa Susana, Angulo Martínez Ignacio, Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones segunda parte, Editorial Mc Graw Hill.
- [4] Larson Roland E., Hostetler Robert P., Edwards Bruce H., Heyd David E., Cálculo y Geometría Analítica Volumen 1, Editorial Mc Graw Hill.
- [5] García Meléndrez José Ángel, Construcción de un robot para detección y localización de fugas de gas. Tesis de Licenciatura, FCFM BUAP, 2007
- [6] Palacios Municio Enrique, Ramiro Domínguez Fernando, López Pérez Lucas José, Microcontrolador PIC16F84. Desarrollo de proyectos, Editorial Ra-Ma,
- [7] http://www.engr.udayton.edu/faculty/jloomis/ece314/notes/devices/binary_to_BCD_Converter.pdf
- [8] gusanoseda.blogspot.mx/p/ciclo-biologico.html
- [9] Franco Sergio, Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos, Editorial Mc Graw Hill.
- [10] <http://pndmx.comze.com/fuga.html>

- [11] www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDonName=en010242
- [12] http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream_sp/oceano/beaufort_sp_max.htm

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. La automatización ha abarcado diferentes áreas, desde la industria hasta la robótica en la era espacial y la domótica.	1
Figura 2. Localización de fugas en ductos urbanos.	2
Figura 3. Detección de feromonas de la mariposa del gusano de seda.	3
Figura 4. Imágenes del sistema de localización de fugas de gas.	4
Figura 5. Comparativa del rango de valores para la toma de decisión del sistema anterior (grafica superior) y el sistema optimizado (grafica inferior).	5
Figura 6. Sensor FIGARO TGS2620 (izquierda) y Microcontrolador PIC16F877A (derecha).	7
Figura 7. Circuito de implementación con el Sensor FIGARO TGS2620.	8
Figura 8. Memoria RAM en cuatro bancos con 368 bytes útiles.	11
Figura 9. Distribución de la memoria de programa del PIC16F877A.	12
Figura 10. Alineamiento de la conversión digital de 10 bits.	14
Figura 11. Señal generada por los módulos CCP1 y CCP2.	16
Figura 12. Arreglo experimental para la toma de lecturas con diferentes cantidades de Etanol.	18
Figura 13. Lecturas obtenidas en VRL con la aplicación de Etanol en ppm.	19
Figura 14. Comparación de la caracterización del sensor con las hojas técnicas del sensor TGS2620.	20
Figura 15. Voltaje simétrico obtenido de una sola fuente de 12 V.	21
Figura 16. Circuitos Restador y Amplificador no inversor respectivamente.	21
Figura 17. Lecturas en VRL con el circuito propuesto con la aplicación de Etanol.	23
Figura 18. Caídas de tensión en la resistencia de carga (VL) con el circuito propuesto.	24
Figura 19. Comportamiento del sensor con intercambio de los ejes y la conversión A/D.	25
Figura 20. Mediciones experimentales y el polinomio tomando en cuenta la concentración de etanol.	26
Figura 21. Comportamiento del sensor y la aproximación con las ecuaciones lineales.	28
Figura 22. Diagrama de flujo que muestra el programa principal.	31

Figura 23. Diagrama de flujo de la rutina display.	33
Figura 24. Relación de los 4 display's del sistema.	33
Figura 25. Ejemplos del método de conversión de número binario al código BCD.	34
Figura 26. Distribución de los bloques en los registros Dato_Dis.	34
Figura 27. Diagrama de flujo de la rutina calibración (calibsens).	36
Figura 28. Estabilización de la salida del sensor al paso del tiempo.	37
Figura 29. Distribución de los sensores en el sistema móvil.	37
Figura 30. Rutina giro de 180° del sistema.	38
Figura 31. Punto de rotación.	40
Figura 32. Rutina adelante (CLSADELANTE).	41
Figura 33. Giro de 90° a la derecha o izquierda.	43
Figura 34. Croquis del espacio cerrado.	44
Figura 35. Croquis del espacio abierto.	45
Figura 36. Prueba en espacio cerrado.	46
Figura 37. Concentración de etanol en las diferentes distancias en el espacio cerrado.	48
Figura 38. Prueba en espacio abierto.	49
Figura 39. Concentración de etanol en las diferentes distancias en el espacio abierto.	52
Figura 40. Comparación de las diferentes pruebas realizadas.	53

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Divisor de voltaje.	9
Ecuación 2. Ecuación para calcular la resolución de la conversión analógica/digital.	13
Ecuación 3. Fórmula para calcular el período de oscilación (PWM).	16
Ecuación 4. Fórmula para calcula la anchura de pulso del módulo CCP1.	17
Ecuación 5. Fórmula para calcularla concentración de etanol en ppm en el recipiente.	18
Ecuación 6. Ecuación para la configuración amplificador no inversor.	22
Ecuación 7. Ecuacion para la configuración restador.	22
Ecuación 8. Monomio que aproxima el comportamiento del sensor de gas.	27
Ecuación 9. Ecuaciones de pendiente de una recta y punto-pendiente de una recta.	27
Ecuación 10. Las 3 ecuaciones lineales que se aproximan al comportamiento del sensor.	27
Ecuación 11. Las 3 ecuaciones lineales redondeadas para facilitar la programación.	27

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Voltajes obtenidos de las tomas de etanol.	19
Tabla 2. Datos calculados con respecto al circuito implementado.	22
Tabla 3. Datos obtenidos del circuito restador y la conversión analógica – digital.	24
Tabla 4. Distribución de registros generales en los bancos de memoria.	29
Tabla 5. Desviaciones que realizo el sistema durante la prueba en el espacio cerrado.	47
Tabla 6. Resultados de las tomas obtenidas de la prueba en el espacio cerrado.	47
Tabla 7. Desviaciones que realizo el sistema durante la prueba en el espacio abierto.	50
Tabla 8. Resultados de las tomas obtenidas de la prueba en el espacio abierto.	51
Tabla 9. Datos obtenidos de 5 pruebas realizadas por el sistema.	53
Tabla 10. Comparación de los 2 sistemas.	53