



BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO
MATEMÁTICAS

*“Sensor de gas a base de resonador de cuarzo para medir
la concentración de etanol con compensación de
temperatura.”*

Tesis presentada como requisito para obtener el grado de:

Licenciado en Física Aplicada.

Por:

José Alfonso Catana Castellanos

Asesorado por:

Dr. Severino Muñoz Aguirre

Puebla, Pue. Septiembre 2014

DEDICATORIA

Este trabajo va especialmente dedicado a mi familia que tanto me ha apoyado en la culminación de esta etapa de mi vida:

A mi mamá Asunción por ser un ejemplo a seguir, por demostrarme que cuando quieres hacer algo, lo puedes hacer, no hay imposibles. Y porque siempre fue un pilar en mi familia y ser la formadora de la persona que ahora soy.

A mi papá Alfonso por enseñarme a vivir, a saber tomar decisiones y a ser una persona que no se debe rendir. Por enseñarme a ayudar sin pedir nada a cambio.

A mi hermana Carmen por ser mi compañera, mi amiga, mi confidente, por ser aquella que soportó todas mis explicaciones y temas de ciencia.

A mis tíos y primos Bernal Castellanos por ser en gran medida un apoyo incondicional, por ser parte de mi formación y parte de mi vida.

A mi novia Xitlali por acompañarme y apoyarme a lo largo de esta carrera y estar conmigo en las buenas y en las malas.

AGRADECIMIENTOS

Mi total y completo agradecimiento al Dr. Severino Muñoz Aguirre por haberme guiado en la realización de mi tesis y por ser pieza fundamental para mi formación como Licenciado. Le agradezco por haberme enseñado que no existen límites y se puede llegar tan lejos como uno quiera.

Agradezco a mis compañeros de generación a Juan, Rafa, Polo, Ángel, Nestor, Gaby, Rosa por su apoyo, amistad y compañerismo a lo largo de toda mi carrera.

A mis compañeros del Laboratorio Tere, Yazzmín, Jesús e Ivan. Y un especial agradecimiento a Azucena y Diana quienes me ayudaron en la realización experimental de la tesis y a Omar, Marco y Oscar por ayudarme en la parte de programación de la misma.

Al Dr. Juan Castillo Mixcoatl y la Dra. Georgina Beltrán Pérez por ser parte importante de mi formación académica durante la licenciatura.

INDICE GENERAL

<i>DEDICATORIA</i>	<i>I</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>II</i>
<i>INDICE</i>	<i>III</i>
<i>1. INTRODUCCIÓN</i>	
1.1 Resumen.	1
1.2 Objetivo general.	2
1.3 Objetivos específicos.	2
1.4 Metas.	3
1.5 Justificación.	3
<i>2. MARCO TEÓRICO</i>	
2.1 Sensor.	5
2.2 Nariz electrónica	5
2.3 Tipos de sensores de gas.	5
2.4 Sensor de cristal resonador de cuarzo (QCM).	7
2.5 Etanol.	9
2.6 Etil celulosa.	10
2.7 Ecuación de Sauerbrey.	10
2.8 Ecuación de concentración en ppm.	12

2.9	Sensor de temperatura LM35.	13
2.10	Microcontrolador PIC y la LCD.	13
3. EXPERIMENTACIÓN.		
3.1	Elaboración de sensores.	16
3.2	Cámara de baño térmico.	16
3.3	Circuito oscilador.	17
3.4	Frecuencímetro.	18
3.5	Adquisición de datos.	19
3.6	Dependencia de la frecuencia del sensor con respecto de la temperatura.	20
3.7	Prototipo Propuesto.	21
3.8	Medidor de frecuencia.	21
3.9	Determinación de la frecuencia estable y el cálculo de la diferencia de frecuencia.	22
3.10	Medición de temperatura.	22
3.11	Conversión a valores de temperatura.	24
3.12	Conversión a código ASCII.	26
3.13	Comunicación con la LCD.	27
3.14	Cálculo de la concentración.	27
3.15	Circuito final con el que se realizan las mediciones.	29

3.16	Proceso de medición de concentración de gas.	32
4.	<i>RESULTADOS OBTENIDOS.</i>	
4.1	Sensor de temperatura	35
4.2	Película de los cristales.	36
4.3	Caracterización con respecto de la temperatura.	37
4.4	Medición de frecuencia.	40
4.5	Caracterización de un segundo sensor de frecuencia.	41
4.6	Respuesta final del sistema.	43
5.	<i>CONCLUSIONES.</i>	45
5.1	Trabajo a futuro	47
6.	<i>BIBLIOGRAFÍA.</i>	48

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen.

Se denomina aire a la mezcla de gases que constituyen la atmósfera terrestre, los cuales permanecen alrededor del planeta Tierra por acción de la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta. Es particularmente delicado, fino, etéreo si está limpio y transparente en distancias cortas y medias. En proporciones ligeramente variables, está compuesto por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (0-7%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles como kriptón y argón; es decir, 1% de otras sustancias.

El hombre respira el aire continuamente y aunque en lo general está compuesto de las partículas antes mencionadas en ocasiones existen otras partículas presentes en condiciones especiales de trabajo. Estas sustancias pueden ser tóxicas para el ser humano en altas concentraciones, por lo que es importante mantener un monitoreo constante de la concentración de estas sustancias en dichas áreas de trabajo.

En la actualidad existe una gran diversidad de sensores de gas, estos se clasifican de acuerdo a su tipo y aplicación. Algunos tipos de sensores utilizados comúnmente para la detección de gases son: óxidos metálicos, efecto de campo, electroquímicos, fibra óptica, ondas acústicas [1], entre otros.

En la actualidad el manejo de sustancias tóxicas en las empresas, fábricas y algunos negocios pequeños no se realiza con el cuidado adecuado, por lo que en ocasiones los trabajadores inhalan estas sustancias y sin darse cuenta se pueden estar intoxicando. Algunas de las empresas grandes y las fábricas ya cuentan con sistemas de control de saturaciones de estas sustancias. El problema con estos sistemas es que son muy costosos y los pequeños negocios no disponen de grandes presupuestos para contar con ellos, además de que la mayoría de los que

existen no consideran la temperatura durante su medición, siendo que a algunos sensores sí les afecta de manera significativa este parámetro.

Es por esto que este proyecto tiene como objetivo construir un dispositivo capaz de medir la concentración de algún gas en un área cerrada compensada con la temperatura. Este dispositivo será práctico y eficiente. Para lograr esto se caracterizó el sensor de concentración de gas que se tiene actualmente con respecto a la temperatura y se desarrolló un circuito para monitorear la temperatura mientras se mide la frecuencia de oscilación del sensor. Para concluir el objetivo se elaboró un programa dentro de un microcontrolador PIC que despliega un valor de concentración de gas en una pantalla LCD. Este valor determinado a partir de la respuesta de los sensores (frecuencia y temperatura) y considerando los resultados obtenidos de la caracterización con temperatura. Finalmente se colocaron todos los componentes manejados en una sola tarjeta para que se construya el prototipo que podrá realizar mediciones fuera del laboratorio.

1.2 Objetivo general.

Construir un sensor capaz de medir la concentración de etanol en un área cerrada compensado con la temperatura. Este sensor será práctico y eficiente.

1.3 Objetivos específicos.

- a) Caracterizar el sensor de concentración de gas que se tiene actualmente con respecto a la temperatura.
- b) Desarrollar un circuito para monitorear la temperatura mientras se mide la frecuencia de oscilación del sensor.
- c) Elaborar un programa que despliegue un valor de concentración de gas a partir de la diferencia de frecuencia y la temperatura.
- d) Reemplazar algunos de los componentes utilizados actualmente en el laboratorio para medir la concentración del gas dentro de un solo dispositivo.

1.4 Metas.

- a) Caracterizar la dependencia de la respuesta del resonador de cuarzo variando la temperatura.
- b) Determinar la relación que existe entre la respuesta del sensor de gas (diferencia de frecuencia) y la temperatura.
- c) Elaborar un circuito para tener valores digitales de un sensor de temperatura comercial.
- d) Diseñar un programa en un microcontrolador PIC 16F877A [2] para la determinación de frecuencia estable, determinar la diferencia de frecuencia, obtener el valor de la temperatura y finalmente calcular la concentración de gas.
- e) Reemplazar la función de la computadora por una LCD y un programa en el microcontrolador PIC.
- f) Instalar dentro de la misma tarjeta, el circuito oscilador del cristal.
- g) Realizar pruebas experimentales para verificar la funcionalidad del sistema.

1.5 Justificación.

Desde siempre la tecnología se ha desarrollado para simplificar la vida del ser humano, desde la rueda hasta los electrodomésticos actuales, todos han hecho que las actividades de la vida diaria sean más simples.

Dentro del desarrollo de la tecnología está el desarrollo de aparatos que puedan cubrir las funciones del ser humano, como lo son las prótesis. Se han desarrollado aparatos para ayudar a funcionar mejor a los oídos, el corazón, los pulmones, las articulaciones, etc. En todas ellas con el fin de cubrir las necesidades de las personas.

Cuando se deseaba evaluar la calidad de algún producto era común contratar gente para que con los sentidos (vista, olfato, gusto, oído y tacto) determinara si el producto era bueno o no. En la actualidad este proceso es realizado por máquinas que a través de diferentes arreglos pueden determinar de

manera más precisa la calidad del producto. A estas máquinas se les denomina sensores.

Un tipo particular de sensor es la “nariz electrónica” [3] la cual sirve para determinar la concentración de algún gas, así como también poder determinar qué tipo de gas es. La importancia de estos sensores radica en que el hombre es vulnerable a inhalar altas concentraciones de diferentes gases sin darse cuenta, y en ocasiones estos gases son peligrosos para su salud. El poder determinar la concentración de estos gases en algunas áreas cerradas y poder prevenir a las personas de inhalarlos puede evitar problemas de salud para las mismas.

En este proyecto se construyó un sensor capaz de determinar la concentración de etanol. Con la característica de que es adaptable para diferentes tipos de gases, solo es necesario determinar la dependencia del sensor a cada tipo de gas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sensor.

Un sensor es un dispositivo que sirve para medir o detectar cantidades física o químicas como la temperatura, la velocidad, la humedad, la presión, etc. La mayoría de estos dispositivos convierten variables físicas en variables eléctricas. Las principales cantidades eléctricas son: resistencia, capacitancia, tensión o voltaje y corriente. [4]

Los sensores tienen muchas áreas de aplicación como lo son la industria automotriz, la robótica, la industria aeroespacial, la medicina, la industria de manufactura, etc.

Los sensores pueden estar conectados a una computadora para obtener ventajas como son el acceso a una base de datos, la toma de valores desde el sensor, etc.

2.2 Nariz Electrónica.

Una nariz electrónica está conformada por un arreglo de sensores electroquímicos en conjunto con un sistema de reconocimiento de patrones también llamado de procesamiento, capaz de reconocer y cuantificar gases simples o complejos [3]. El desarrollo de dichos sistemas ha evolucionado el modo de operar en diversos ámbitos industriales tales como la industria de alimentos.

2.3 Tipos de sensores de gas.

En la actualidad existe una gran diversidad de sensores de gas, estos se clasifican de acuerdo a su tipo y aplicación [1].

Los sensores de gas son dispositivos que sirven para reconocer y cuantificar gases simples o complejos. Su importancia radica en las múltiples aplicaciones

que se les ha dado, principalmente en la industria de alimentos y de solventes. Algunos ejemplos de estos se muestran a continuación.

- ❖ Sensores de gas de óxidos metálicos.- Tienen un amplio rango en la detección de olores. El gas es detectado por el efecto en la resistividad eléctrica del dióxido de estaño, resultando en cambios de conductancia por algunas reacciones de combustión. Generalmente operan a altas temperaturas (entre 300°C y 550°C).

- ❖ Sensores de gas de efecto de campo.- Están basados en estructuras semiconductoras en donde la compuerta de metal es un catalizador sensible (Figura 1). La sensibilidad y selectividad de éstos sistemas depende de la selección de la compuerta y la temperatura, la cual debe encontrarse entre un rango de 50°C y 200°C.

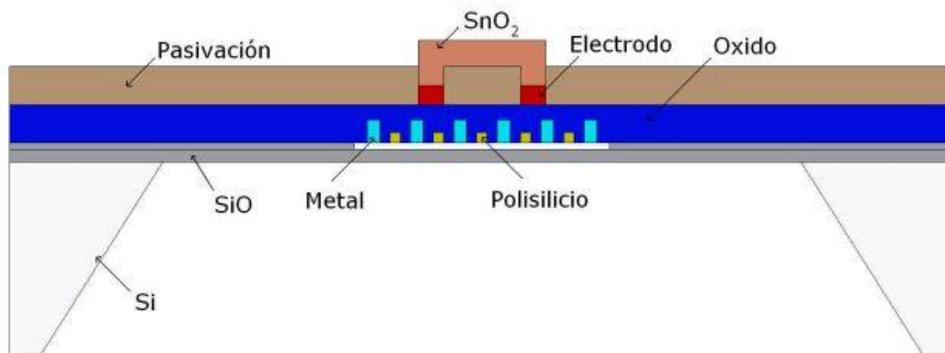


Figura 1.- Diagrama de sensor de efecto de campo. [5]

- ❖ Sensores de gas electroquímicos.- Están basados en la oxidación electroquímica o reducción del gas en contacto con la superficie de un electrodo. tienen un tamaño de entre 3 y 5 cm de diámetro, y el tiempo de vida de dichos sensores es de aproximadamente 2 años. Algunas de las desventajas de este tipo de sensores de gas es su tamaño y su sensibilidad para un limitado número de gases.

- ❖ Sensores de gas de fibra óptica.- La fibra óptica es utilizada para el desarrollo de sensores de gas en su mayoría de tipo orgánico; algunas de las

propiedades de la fibra óptica pueden ser medidas mediante la luminiscencia, la absorción, la fluorescencia y la reflexión. En los sensores de gas de fibra óptica se miden los efectos sobre la luz provocados por la variación de la película sensible cuando ésta interactúa con las moléculas de gas.

❖ Sensores de gas de ondas acústicas.- Operan por la detección del efecto de adsorción de moléculas en la propagación de ondas acústicas. El modo de operación de estos dispositivos consiste en adherir moléculas de gas a estos sensores lo cual provoca un cambio de masa y frecuencia de oscilación en el dispositivo (Figura 2), el rango de frecuencia utilizado para estos sensores se encuentra entre 1MHz a 500 MHz.

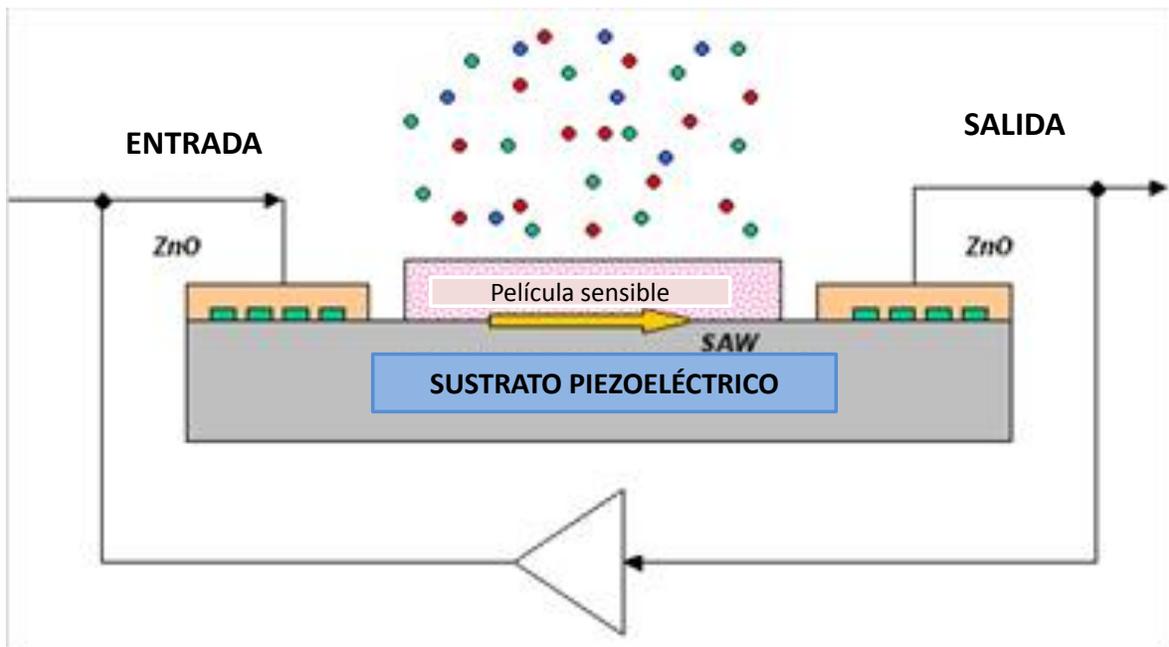


Figura 2.- Diagrama de sensor de gas de ondas acústicas

2.4 Sensor de cristal resonador de cuarzo (QCM).

Los sensores que se utilizaron en este proyecto son los de ondas acústicas trabajando a 12 MHz. Algunas de las ventajas de utilizar e implementar este tipo de sensores es que dentro de sus características principales tienen una alta

precisión, una respuesta casi inmediata y un bajo costo, además que se pueden obtener diferentes características únicamente cambiando la película sensible.

Los sensores de cristal de cuarzo sirven para conocer la concentración de gas en un espacio, se fabrican de manera muy sencilla, simplemente se coloca una película sensible de cualquier material, en nuestro caso de etil celulosa. Dicho material se diluye en cloroformo y se deposita sobre cada cara del cristal de cuarzo, se deja secar para que el cloroformo se evapore, y solo hay que verificar que la frecuencia natural de oscilación del cristal comparada con la que se obtiene después de tener la película sensible no sea muy grande, ya que esto indica que el cristal se sobresaturó y podría provocar que este ya no oscile. Un ejemplo de un cristal de cuarzo se observa en la Figura 3.

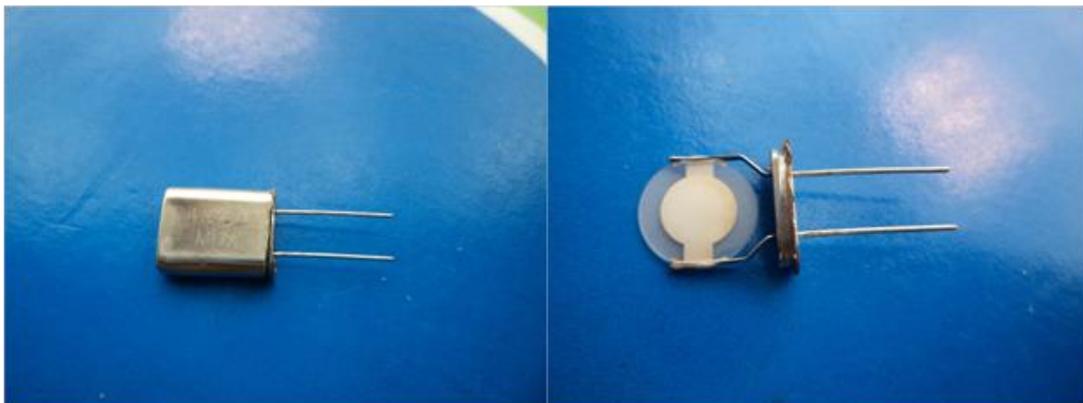


Figura 3.- QCM utilizado como sensor de concentración de gas.

La película sensible en el cristal sirve para atrapar las partículas evaporadas de alguna sustancia que se encuentra en el ambiente. Al atrapar las partículas aumenta la masa de la película sensible y como consecuencia la frecuencia del cristal disminuye (ver Ec. (1) pag.11). Mientras más partículas haya en el ambiente, mayor será la cantidad de partículas adheridas en la película y el corrimiento de frecuencia del cristal será mayor (Ver Figura 4).

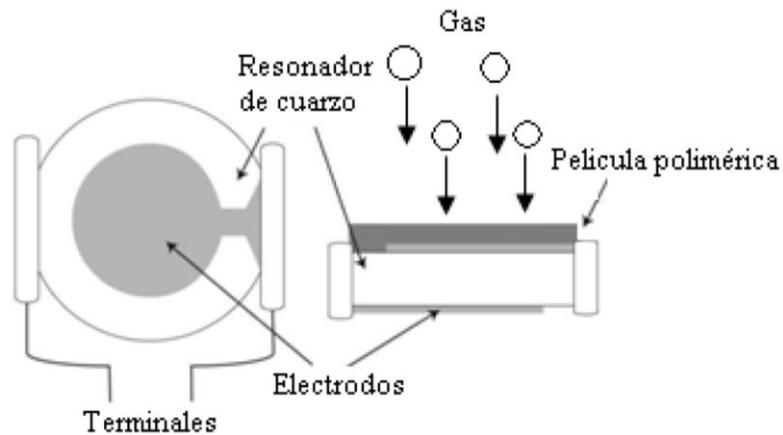


Figura 4. Diagrama de funcionamiento del cristal atrapando las partículas de gas. [6]

2.5 Etanol.

La sustancia que se utilizó en este proyecto para medir concentración fue etanol.

El etanol es un compuesto químico que también se conoce bajo el nombre de alcohol etílico, el cual es un líquido sin color ni olor, bastante inflamable que posee un punto de ebullición en torno a 78°C. Su fórmula es $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ (Ver Figura 5), se trata del principal producto que forma parte de la composición de las bebidas alcohólicas, incluyendo el vino, con un porcentaje de alrededor de un 13%, pero puede superar el 50% en numerosos tipos de licores. [7]

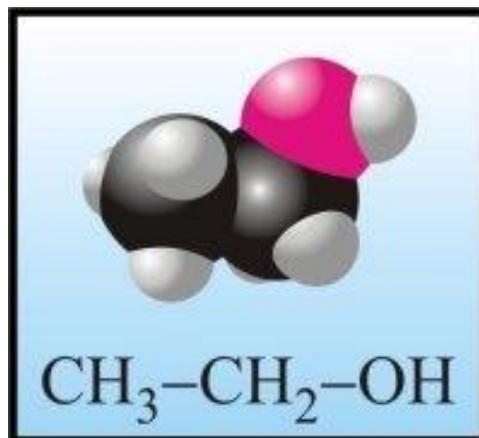


Figura 5.- Diagrama de la molécula de etanol.

De las propiedades físicas del etanol, podemos destacar su estado de agregación, que es líquido, su apariencia, la cual es incolora, así como su masa molar, que es de 46.07 g/mol. En cuanto al punto de fusión y ebullición, sus valores son de -114.3 °C y 78.4 °C respectivamente.

Se escogió esta sustancia debido a que tiene propiedades que favorecen las mediciones, no es nocivo a bajas concentraciones y su evaporación es muy rápida, lo que hace que las mediciones no lleven más de 15 min. Encontramos en el etanol un gas conveniente para la respuesta notable del sensor. Otra razón es que la respuesta de etil celulosa a etanol es muy alta.

2.6 Etil celulosa.

Es un éter (grupo funcional del tipo R-O-R') de celulosa formado por reacción del cloruro de etilo con celulosa alcalina. Es insoluble en agua y en los jugos gastrointestinales, por lo tanto no se recomienda para recubrimiento de tabletas. El polímero es soluble en la mayoría de los solventes orgánicos. [8]

La etilcelulosa es utilizada en este proyecto como la película sensible que lleva cada uno de los sensores utilizados. Está película en el cristal produce una buena respuesta del sensor para el etanol.

2.7 Ecuación de Sauerbrey.

La ecuación de Sauerbrey fue desarrollada por G. Sauerbrey en 1959 [9] como un método para correlacionar los cambios en la frecuencia de oscilación de un piezoeléctrico de cristal con la masa depositada en ella.

La ecuación se obtiene mediante el tratamiento de la masa depositada como si se tratara de una extensión del espesor del cuarzo. [1] Debido a esto, la correlación de la masa con la frecuencia (tal como se determina por la ecuación de Sauerbrey) es en gran medida independiente de la geometría de los electrodos. Esto tiene la ventaja de permitir la determinación de masas sin necesidad de calibración.

La ecuación de Sauerbrey se basa en un factor de sensibilidad lineal, C_f , el cual es una propiedad fundamental del cristal QCM.

$$\Delta f = -C_f \Delta m \quad (1)$$

Donde Δf representa el cambio en la frecuencia en Hertz, y Δm el cambio de masa por unidad de área en gr/cm^2 .

Butterworth Van Dyke [10] diseñó un modelo eléctrico para representar el comportamiento eléctrico de un resonador de cristal de cuarzo (Figura 6). Este modelo se utiliza a menudo cerca de resonancia en serie.

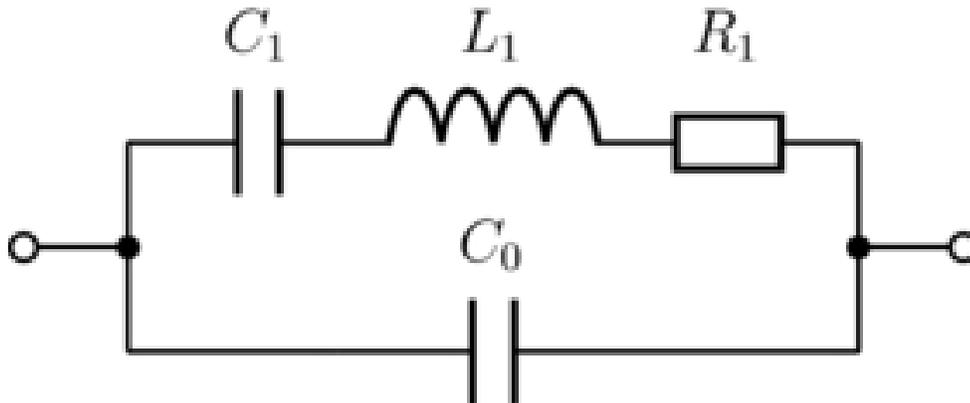


Figura 6.- Modelo eléctrico del funcionamiento del resonador de cuarzo.

La ecuación de Sauerbrey se define como [3]:

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{A\sqrt{\rho_q\mu_q}} \Delta m \quad (2)$$

Dónde:

f_0 = Frecuencia de resonancia o frecuencia natural del cristal (Hz)

Δf = Cambio de frecuencia en el cristal (Hz)

Δm = Cambio de masa (g)

A = Área activa del cristal piezoeléctrico (área entre los electrodos, cm^2)

ρ_q = Densidad de cuarzo ($\rho_q = 2,648 \text{ g / cm}^3$)

μ_q = Módulo de cizallamiento del cuarzo para corte AT ($\mu_q = 2.947 \times 10^{11} \text{ g/cm}\cdot\text{s}^2$)

Como se observa, el cambio de la frecuencia de resonancia Δf en los cristales de cuarzo está directamente relacionado con el cambio de masa superficial, es decir, el incremento de masa sobre la película sensible provoca un corrimiento en la frecuencia de resonancia, tal como lo describe la ecuación de Sauerbrey [1]. Sustituyendo los valores comunes para el cristal resonador de cuarzo obtenemos finalmente:

$$\Delta f = -2.3 \times 10^{-6} f_0^2 \frac{\Delta M}{A} \quad (3)$$

2.8 Ecuación de concentración en ppm.

Para obtener el valor de la concentración de las sustancias a medir por los sensores desarrollados se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_{ppm} = \frac{(22.4 \text{ L/mol}) T_\alpha \delta V_l \times 10^3}{(273^\circ\text{K}) P_m V_{tot}} \quad (4)$$

Donde:

T_α = Temperatura ambiente a la cual se trabaja.

δ = densidad de la sustancia a medir.

V_l = Cantidad de sustancia inyectada.

P_m = Peso molecular de la sustancia.

V_{tot} = Volumen total de la cámara contenedora de gas.

Para automatizar el sistema es necesario manejar un microcontrolador para recibir datos del frecuencímetro y del sensor de temperatura, el que se manejó en este trabajo es el PIC16F877A [2] (Microchip), el cual es muy práctico por sus 5 puertos de entrada/salida, sus módulos de comunicación y por su conversor analógico digital. (Ver Figura 8)

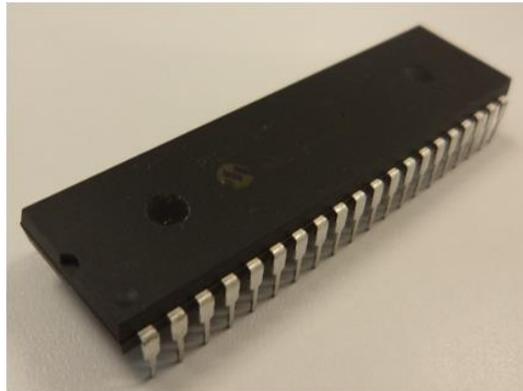


Figura 8. Imagen del microcontrolador PIC 16F877A fabricado por microchip.

La LCD (liquid crystal display) es una pantalla de cristal líquido, es delgada y plana, formada por un número de píxeles en color o monocromáticos que pueden formar diferentes caracteres alfanuméricos. La LCD cuenta con 14 pines I/O (Entrada/Salida). Para enviar datos o comandos utiliza 8 de estos pines, se alimenta con 5 Volts y con dos de sus pines controla el contraste con ayuda de un potenciómetro. Los últimos tres pines controlan la forma de trabajo de la LCD, que puede ser de lectura o escritura (R/W), datos o comandos (RS) y el último pin para ordenar que se realice la acción indicada (E) [12].



Figura 9. Imagen de la LCD que se utilizó.

Con estos elementos es posible tener un sistema más práctico al que se tenía anteriormente con cuatro componentes (circuito oscilador, frecuencímetro, sensor de temperatura, computadora).

3. EXPERIMENTACIÓN

3.1 Elaboración de sensores.

El resonador de cuarzo se encuentra como un componente electrónico en su respectiva protección, la cual debe ser removida. Con ayuda de una base para sostener el cristal y un taladro con una pieza esmeril se quita el contorno con mucho cuidado de no romper las patitas del componente, estos cristales son de 12 MHz. (Ver Figura 3)

Se preparó la solución de la película, la cual se hizo con 1 mg de Etil Celulosa y 10 ml de Cloroformo.

Se trabajó con cuatro cristales. Se colocó el primero en el circuito oscilador para registrar su frecuencia de oscilación. Luego se le depositó una cantidad de 1 μ l de la sustancia con ayuda de un gotero (a este método se le conoce como casting) [3]. Primero se depositó en una cara del cristal cuidando que quedara uniformemente distribuida sobre el electrodo, una vez que se evapora el cloroformo, la película de etil celulosa queda adherida en la cara del cristal. Luego se realizó lo mismo con la otra cara, se colocó nuevamente en el circuito y se midió su nueva frecuencia. [9] Se realizó este proceso con los 4 cristales.

3.2 Cámara de baño térmico.

La parte experimental de este proyecto se realizó con una cámara comercial marca NESLAB modelo RTE 740, en la que se inyectan los gases a medir. La cámara está colocada dentro de un baño térmico, lo que permite tener la temperatura en el sistema prácticamente constante durante la medición (Ver Figura 10). Con esto es posible caracterizar la respuesta del sensor teniendo el sistema a la temperatura deseada con valor constante. El volumen de la cámara es de aproximadamente 1 litro.



Figura 10.- Cámara dentro de baño térmico.

3.3 Circuito oscilador.

La función de este circuito es excitar al QCM (el sensor) para que pueda estar oscilando, produciendo una señal cuadrada a la salida de la misma frecuencia de oscilación del cristal.

Para este circuito se utilizó un sistema de compuertas inversoras (SN74HCU04N) [13], una resistencia de $1\text{ K}\Omega$, 2 capacitores de 100 pF , y el cristal QCM. El diagrama del circuito se observa en la Figura 11.

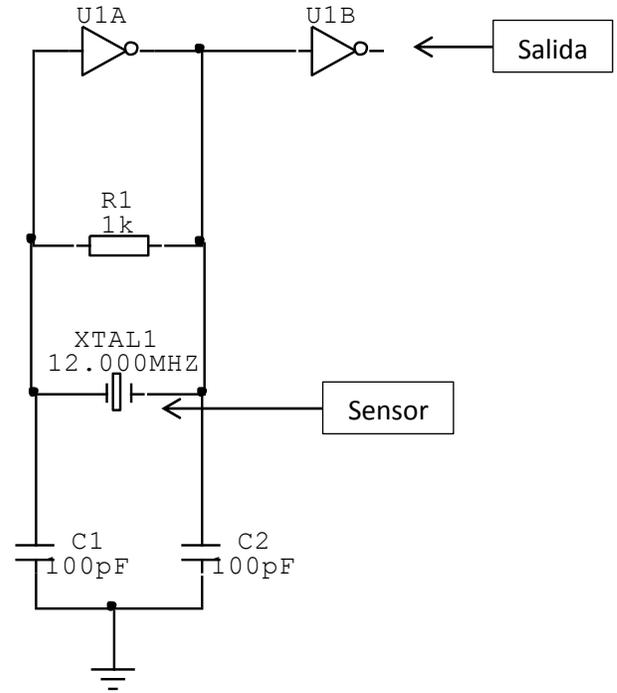


Figura 11. Diagrama del circuito oscilador del sensor.

3.4 Frecuencímetro.

El frecuencímetro utilizado para medir la respuesta del circuito oscilador fue diseñado y elaborado en el laboratorio [14]. Este frecuencímetro realiza mediciones de frecuencia cada segundo. El valor de frecuencia se visualiza en una pantalla LCD (Ver Figura 12). También el frecuencímetro tiene la capacidad de ir enviando los valores obtenidos a una computadora. En la computadora se realizó una interface en labview para monitorear los datos recibidos.



Figura 12. Frecuencímetro fabricado en el laboratorio.

3.5 Adquisición de datos.

La adquisición de datos se logra a través de una interface desarrollada en LabView, en la PC, la cual va realizando los registros de las frecuencias medidas durante el proceso en que se realiza la medición, al mismo tiempo que nos muestra la gráfica de la respuesta (Ver Figura 13). Se realiza una medición cada segundo.

La comunicación se hace a través de un cable serial, el cual va conectado del frecuencímetro a la PC.

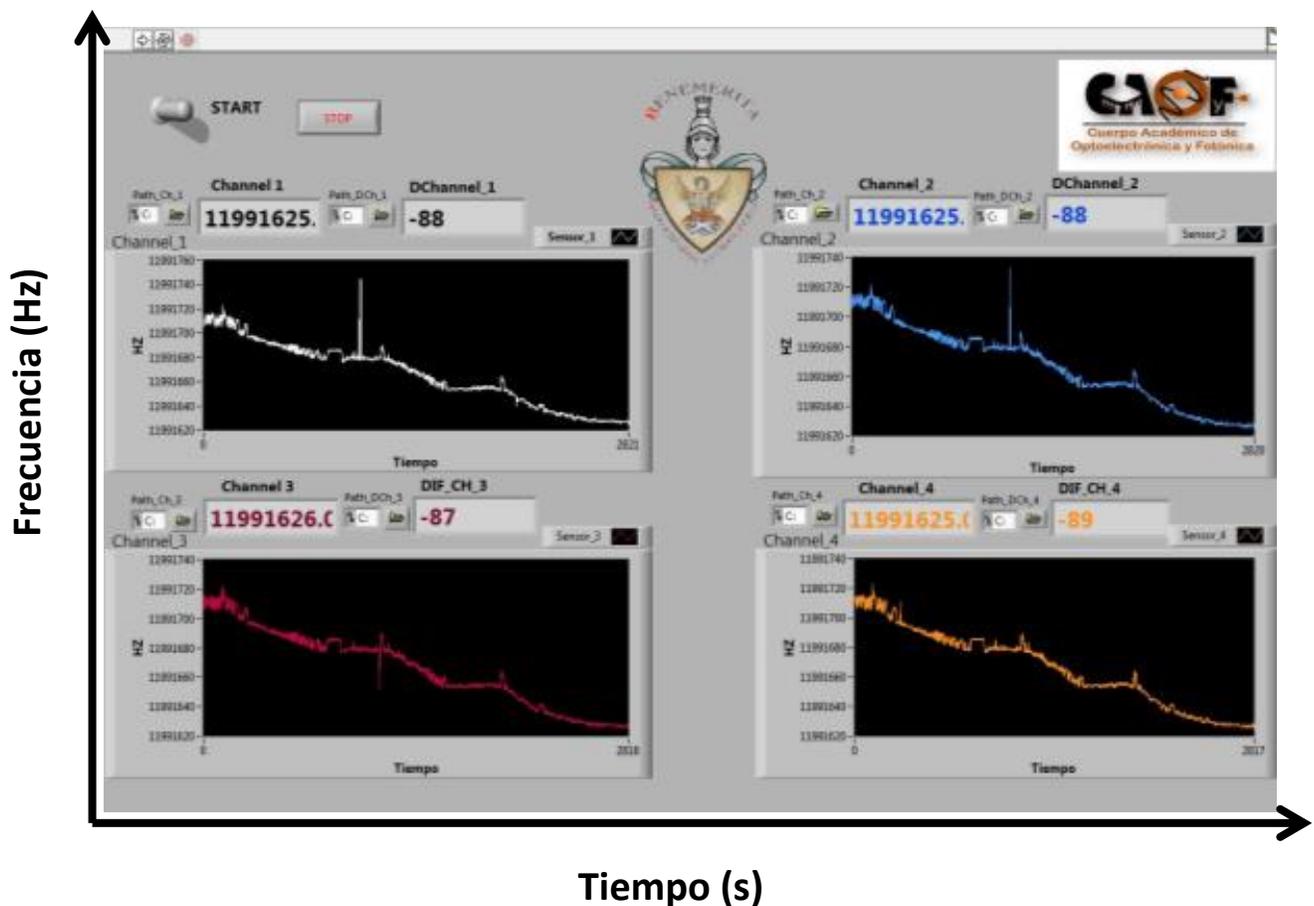


Figura 13. Interface de LabView para capturar los datos del frecuencímetro.

3.6 Dependencia de la frecuencia del sensor con respecto de la temperatura.

Se realizó el proceso de determinación de la respuesta del sensor QCM con respecto a variaciones de temperatura, el sensor utilizado fue el sensor 4 de la caracterización anterior.

Para obtener un valor de concentración en ppm (partes por millón) se utiliza la ecuación (4) con los siguientes valores para las constantes:

$$\delta = 0.78 \text{ gr/cm}^3.$$

$$P_m = 46.07 \text{ g/mol}$$

$$V_{tot} = 1 \text{ L}$$

Quedando la ecuación cómo:

$$C_{ppm} = \frac{(17.47)T_\alpha(0.78)V_l \times 10^3}{(273^\circ K)(46.07)(1)}$$
$$C_{ppm} = 1.0834T_\alpha V_l \quad (5)$$

Con esta ecuación transformamos los valores de la inyección en microlitros para cada temperatura en concentración en ppm. Obteniendo una gráfica de la Diferencia de frecuencia que depende de la concentración en ppm. Está gráfica se invierte teniendo la concentración en ppm dependiendo de la diferencia de frecuencia. Por lo tanto para determinar la concentración se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración} = m(T)\Delta f \quad (6)$$

Donde m es la pendiente de la recta, la cual depende de la temperatura. Para determinar el comportamiento de la pendiente se graficó el valor de la temperatura contra la pendiente de cada recta obtenida para cada temperatura. Se

obtuvo la ecuación que más se aproxima a la gráfica obtenida, y con esta se determina la pendiente de la recta para una temperatura medida.

Se realizó la caracterización de un segundo cristal, en esta ocasión con una diferencia de frecuencia (antes de depositar la película y después de depositar la película) de 4271 Hz.

Para este cristal solo se realizaron mediciones a 3 temperaturas diferentes y se realizó el mismo proceso que para el caso anterior.

3.7 Prototipo propuesto.

Los cuatro componentes del sistema (circuito oscilador, frecuencímetro, sensor de temperatura y computadora) con el que se realizan las mediciones ocupan mucho espacio, tienen muchos cables y además no son prácticos para transportarlos para hacer medidas en lugares fuera del laboratorio. Por lo que se desarrolló un prototipo práctico para realizar mediciones fuera del laboratorio. Para esto se utilizó: un sensor de temperatura LM35, un microcontrolador PIC, y una pantalla LCD.

Se desarrollaron un conjunto de programas dentro del microcontrolador PIC para realizar un conjunto de funciones para determinar la concentración de gas en ppm automáticamente. Los programas desarrollados se explican a continuación.

3.8 Medidor de frecuencia.

El método para medir la frecuencia se realiza utilizando los temporizadores del PIC llamados TMR0 y TMR1 [15]. En el programa lo que se realiza es la activación del TMR0 para el cual ya se ha precargado un valor para que haga una temporización de 1 segundo, luego se activa el TMR1 como contador de pulsos externos. El valor registrado corresponde a la frecuencia que se mide. La frecuencia es igual al número de pulsos contados durante el segundo de temporización. Un diagrama del principio de medición se muestra en la Figura 14.

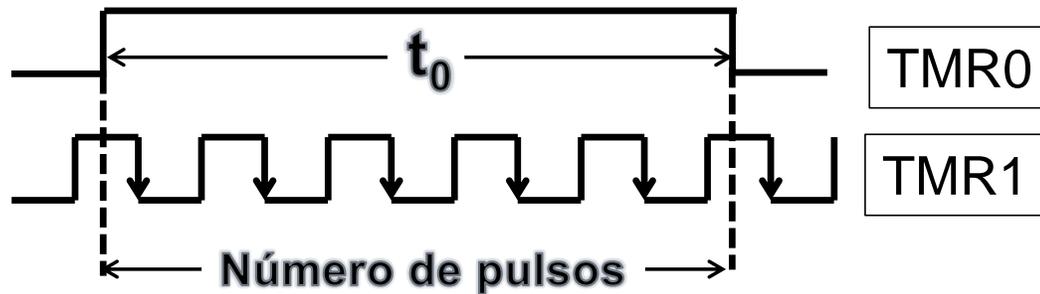


Figura 14.- Diagrama del principio de funcionamiento del medidor de frecuencia.

3.9 Determinación de la frecuencia estable y el cálculo de la diferencia de frecuencia.

Este programa lo que hace es recibir los valores de frecuencia que llegan del medidor de frecuencia. Se recibe un valor y es guardado en uno de los registros del microcontrolador, se recibe un segundo valor y es comparado con el primer valor recibido.

El valor de la frecuencia es muy difícil que sea completamente constante por lo tanto se realizan verificaciones dentro de un rango de ± 4 Hz. La frecuencia constante se obtiene cuando este valor se mantiene estable por aproximadamente 8 minutos. Este valor obtenido es considerado la frecuencia inicial. Luego toda frecuencia obtenida se restará de la frecuencia inicial para obtener una diferencia de frecuencia (Δf). (Ver Figura 15). Estas mediciones se realizan a una temperatura constante determinada inicialmente en la cámara de baño térmico.

3.10 Medición de temperatura.

Para medir la temperatura se realizó un programa en el microcontrolador PIC utilizando su conversor analógico/digital (CAD). Este programa se utiliza para convertir los valores de voltaje enviados por el sensor de temperatura a números binarios, a través del pin AN0 del microcontrolador PIC (Ver Figura 16). Este programa es sencillo, el pin AN0 recibe los valores de voltaje que envía el sensor de temperatura LM35. Dentro del microcontrolador PIC se realiza la conversión

analógica/digital. El valor obtenido se guarda en un registro del microcontrolador.
[16]

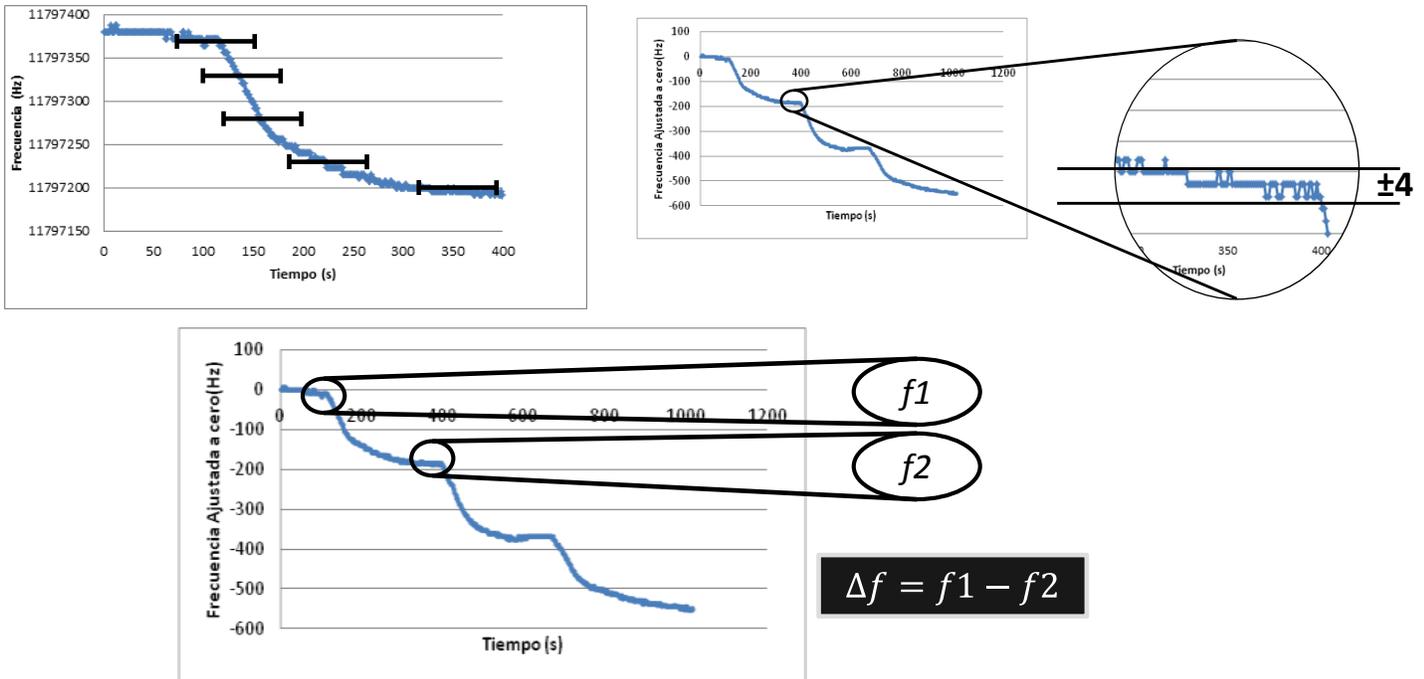


Figura 15.- Diagrama de la forma en que se realiza la determinación de la frecuencia estable y el cálculo de la diferencia de frecuencia.

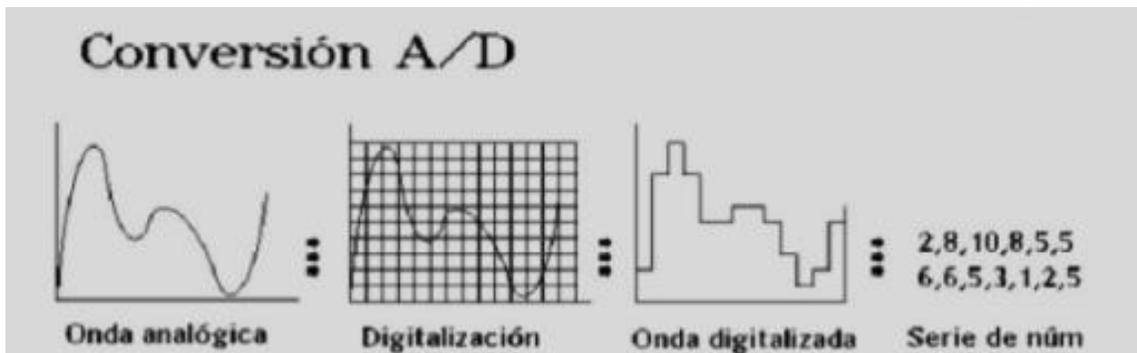


Figura 16.- Diagrama del funcionamiento del Conversor Analógico Digital (CAD)

Se realizó una caracterización del conversor analógico digital utilizando un potenciómetro que controlaba el voltaje de entrada de 0 a 5 V.

Se sabe que el 200 en binario se representa como 11001000, por lo tanto al número que se multiplica por 200 se le realizan tres corrimientos a la izquierda y se guarda ese número de 2 registros. Luego se realizan tres corrimientos más y el número obtenido se suma al anterior y se guarda en el mismo registro. Se realiza un último corrimiento y también se suma. Así es como se realiza la multiplicación. En la Figura 18 se muestra un ejemplo del proceso.

Registro donde se realizan los corrimientos																
Número 202									1	1	0	0	1	0	1	0
1er corrimiento							1		1	0	0	1	0	1	0	
2do corrimiento						1	1		0	0	1	0	1	0		
3er corrimiento y 1er número que se agrega					1	1	0		0	1	0	1	0			
4to corrimiento				1	1	0	0		1	0	1	0				
5to corrimiento			1	1	0	0	1		0	1	0					
6to corrimiento y 2do número que se agrega		1	1	0	0	1	0		1	0						
7mo corrimiento y 3er número que se agrega	1	1	0	0	1	0	1		0							

Registro de almacenamiento de números 202x200																
1er número						1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
2do número			1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3er número		1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Suma Total 40400	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0

Figura 18.- Ejemplo de algoritmo para multiplicar por 200.

Para el caso de la división el valor correcto del divisor debe ser 255, pero debido a la complejidad del algoritmo para dividir se aproximó este valor a, ya que así se tiene la división entre un valor de 2^n (en este caso 2^8), por lo tanto solo se realizan corrimientos de los dígitos del dividendo n lugares a la derecha, entonces para dividir entre 256 el corrimiento se hace 8 veces. Este cambio nos genera un error en el valor de temperatura del 0.39%.

Además de estas subrutinas se tuvieron que agregar más, debido a que los registros del microcontrolador PIC no tienen capacidad para números muy grandes, ni para manejar decimales, por lo que se tuvo que manejar más de un registro para la multiplicación y un registro adicional con un análisis especial para manejar los decimales al momento de dividir.

3.12 Conversión a código ASCII.

Para poder presentar los valores obtenidos en la pantalla de la LCD se deben convertir los valores a código ASCII. [17]

45	Corrimiento							1	0	1	1	0	1	
1<5	Corrimiento						1	0	1	1	0	1		
2<5	Corrimiento					1	0	1	1	0	1			
5=5	No corrimiento				1	0	1	1	0	1				
	Suma 3					1	1							
	Resultado				1	0	0	0	1	0	1			
	Corrimiento			1	0	0	0	1	0	1				
1<5	Corrimiento			1	0	0	0	1	0	1				
	Resultado		1	0	0	0	1	0	1					
				4			5							

Figura 19.- Ejemplo de algoritmo de corrimiento y suma-3.

Para realizar este programa de conversión se utiliza el algoritmo “corrimiento y suma-3” el cual consiste en crear paquetes de cuatro bits vacíos a la izquierda del número a convertir (de derecha a izquierda: unidades, decenas, centenas, etc.). Se recorre el número hacia la izquierda. Se verifica que el número que está dentro del primer paquete de 4 bits (unidades) sea menor que 5. Si es así se recorrerá nuevamente el número hacia la izquierda. Si el número es 5 o mayor, se le sumará un 3 (0011 en binario) al número que está dentro del paquete de 4 bits y luego se volverá a recorrer el número. Este proceso se repite en cada corrimiento.

El proceso de verificación de menor que 5 se realiza para cada paquete de 4 bits, y en cada caso si es mayor o igual a 5 se le suma un 3 (0011 en binario) al paquete que cumpla la condición. El proceso se repite el número de veces igual al número de dígitos binarios del número a convertir. En el último corrimiento no se realiza verificación ni suma. Un ejemplo de esto se puede ver en la Figura 19.

3.13 Comunicación con la LCD.

Para manejar la LCD se utilizó el manual que contenía la información de la LCD [18]. Primero se configura para recibir comandos y se le envía lo siguiente:

- Se envía el comando limpiar pantalla: CLEAR DISPLAY (00000001).
- Se manda el inicio de la programación: FUNCTION SET (00111000). Se programa para bus de 8 bits, en 2 líneas de 16 caracteres, cada uno de ellos de 5x7 pixeles.
- Se enciende la pantalla: DISPLAY ON/OFF (00001111). Activamos la pantalla, el cursor y el parpadeo del mismo.
- Se envía el comando ENTRY MODE SET (00000110) que activa el tipo de desplazamiento del cursor y del texto escrito.

Con esto la LCD está lista para recibir datos. Se pone ahora la LCD en modo de recepción de datos y se le envían a través de las 8 líneas para datos utilizando el código ASCII. Primero se colocan los datos en el bus correspondiente y después se manda un pulso a través de la línea E (Pin 6) para activar el despliegue.

3.14 Cálculo de la concentración.

Para realizar el cálculo de la concentración se debe tener primero el valor de la frecuencia inicial. Luego se mide la temperatura y se guarda el valor en un registro.

Para determinar la concentración primero se debe determinar la pendiente de la recta. La ecuación que nos determina dicha pendiente es de la forma:

$$m(T) = C_2T^2 + C_1T + C_0 \quad (8)$$

Donde C_1 y C_2 se determinaron a partir de las mediciones experimentales. Los valores de estas constantes son guardadas en 3 registros diferentes.

Primero se realiza la elevación al cuadrado del valor de temperatura. Este se calcula considerando que se realiza $T \times T$. Se guarda cada T en un registro diferente. Se verifica el bit 0 del primer registro, si es UNO guardamos el registro 2 en un nuevo registro llamado "resultado", si es cero no se hace nada. Se realiza un corrimiento a la derecha en el registro 1, y se realiza el mismo proceso solo que si es UNO se suma el número recorrido con el que se tenía en resultado. Se repite el proceso hasta que pase el último bit de registro 1. Un ejemplo se muestra en la Figura 20.

Registro 1=11								Registro 2=11								
1	0	1	1					Paso 1					1	0	1	1
	1	0	1	1				Paso 2				1	0	1	1	
		1	0	1	1			Paso 3			1	0	1	1		
			1	0	1	1		Paso 4		1	0	1	1			

Resultado							
				1	0	1	1
			1	0	1	1	
		0	0	0	0		
	1	0	1	1			
	1	1	1	1	0	0	1
							Suma total

Figura 20.- Ejemplo de algoritmo para elevar al cuadrado un número.

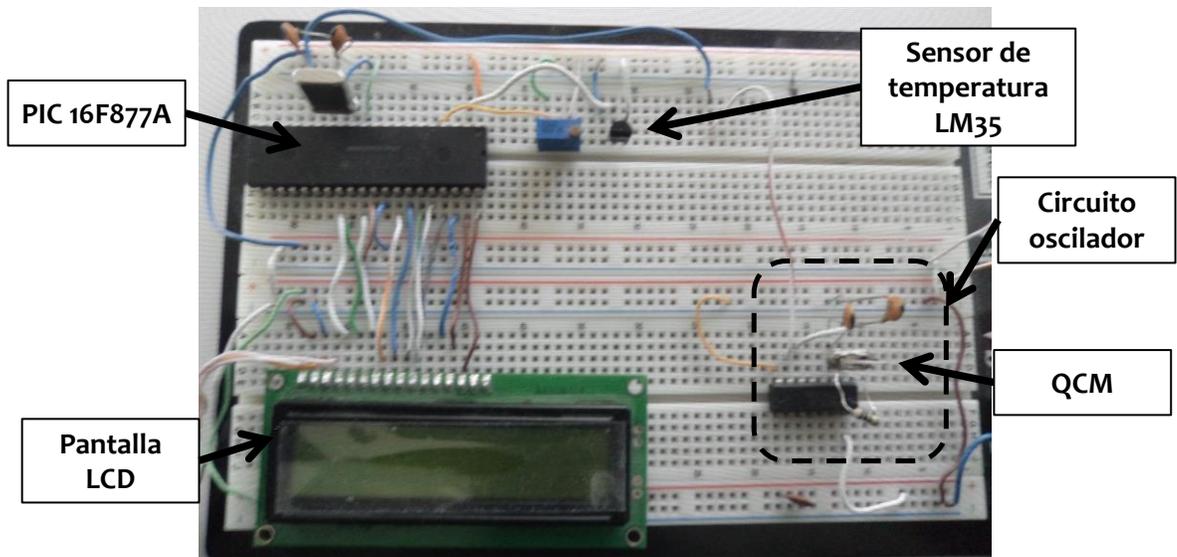
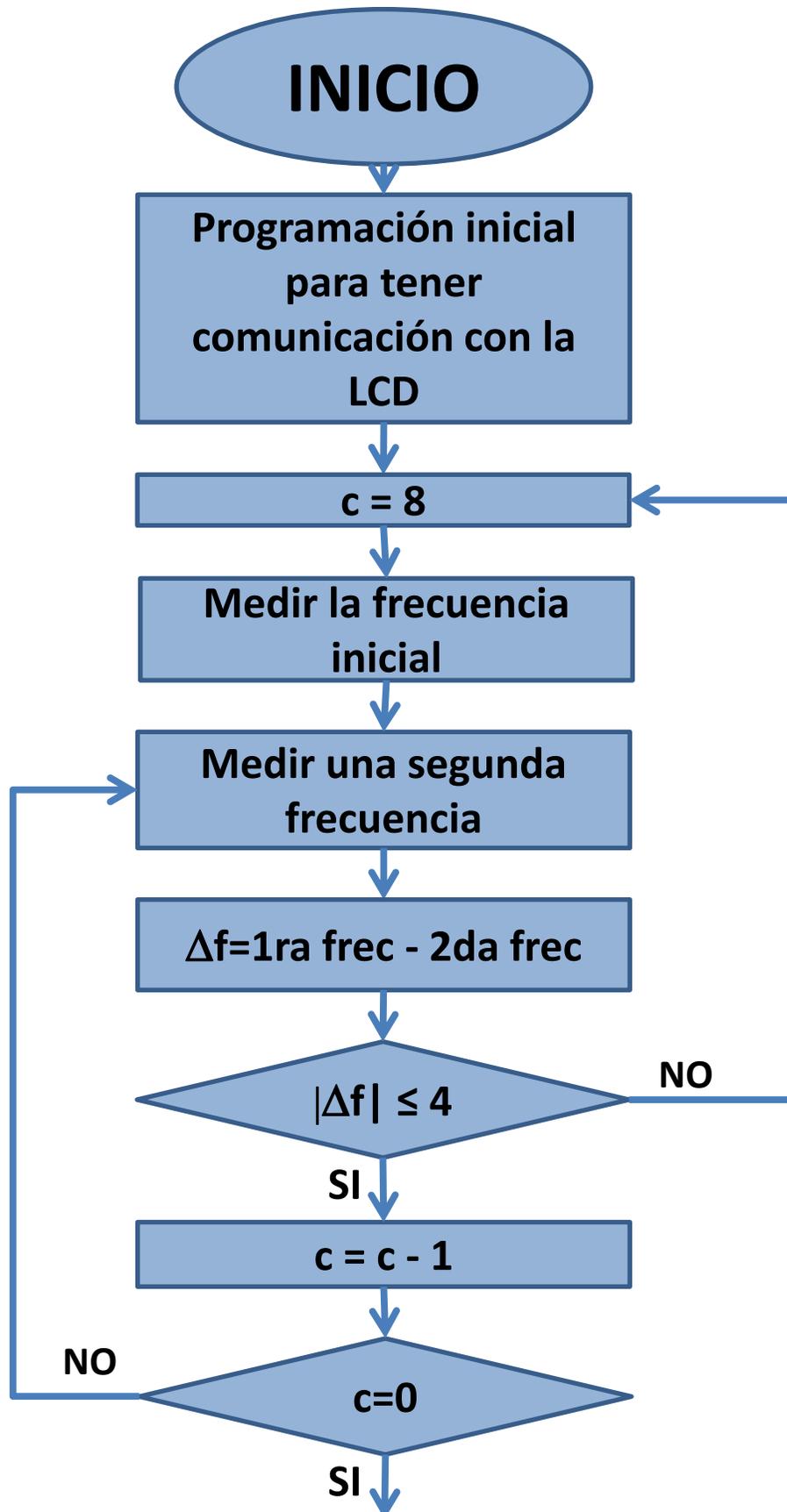


Figura 21. Diagrama del circuito final con el que se realiza la medición de concentración de gas y la fotografía del circuito.

En la Figura 22 se muestra el diagrama de flujo del proceso de medición de concentración de etanol con compensación de temperatura.



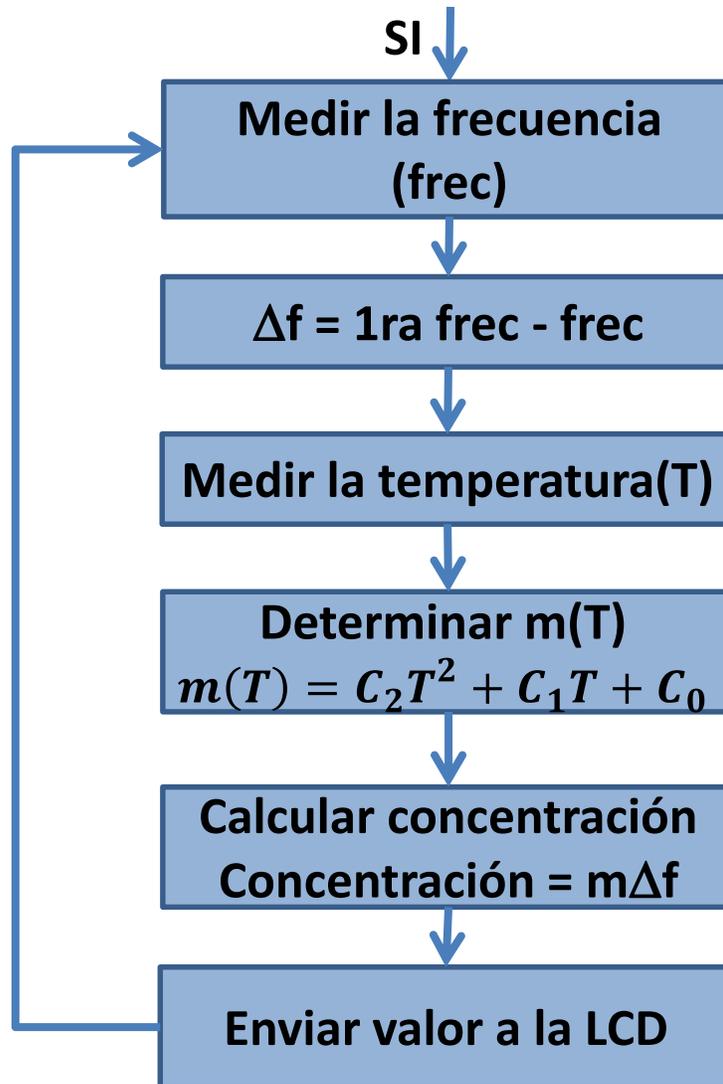


Figura 22. Diagrama de flujo del proceso que se realiza dentro del microcontrolador PIC para realizar el cálculo de la concentración de etanol con compensación de temperatura.

3.16 Proceso de medición de concentración de gas.

El proceso para medir la concentración de gas es el siguiente:

- 1) Se coloca uno de los sensores de cristal de cuarzo dentro de la cámara y se conecta al circuito oscilador. Se mide la frecuencia de oscilación con un frecuencímetro. Los datos que va midiendo el frecuencímetro los envía a la

computadora y la computadora va registrando y graficando los valores capturados (Ver Figura 23).

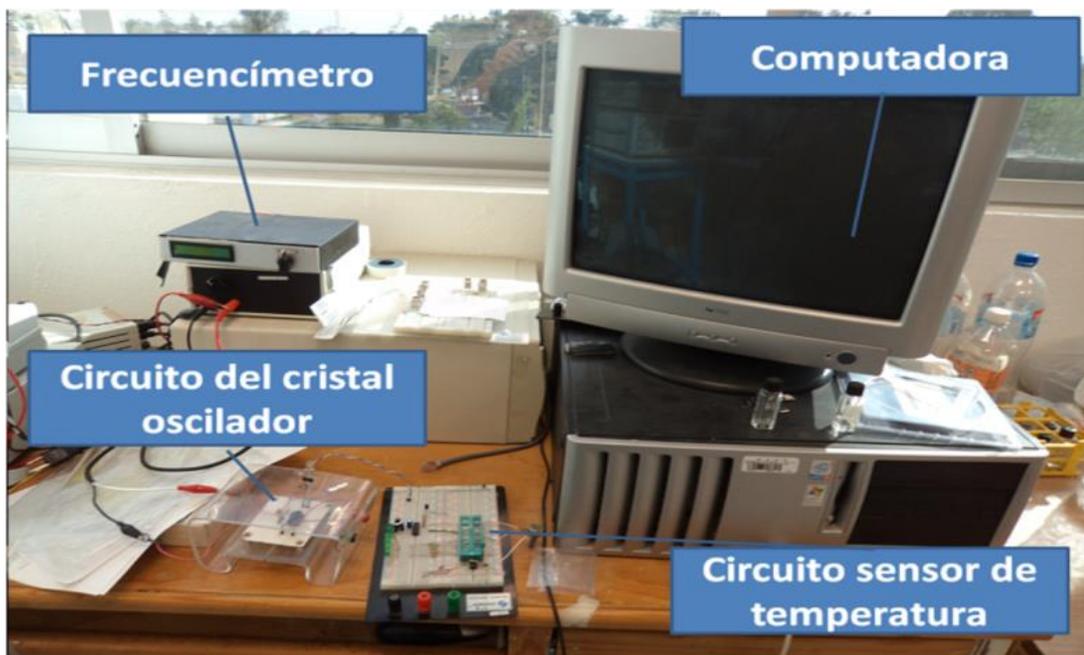
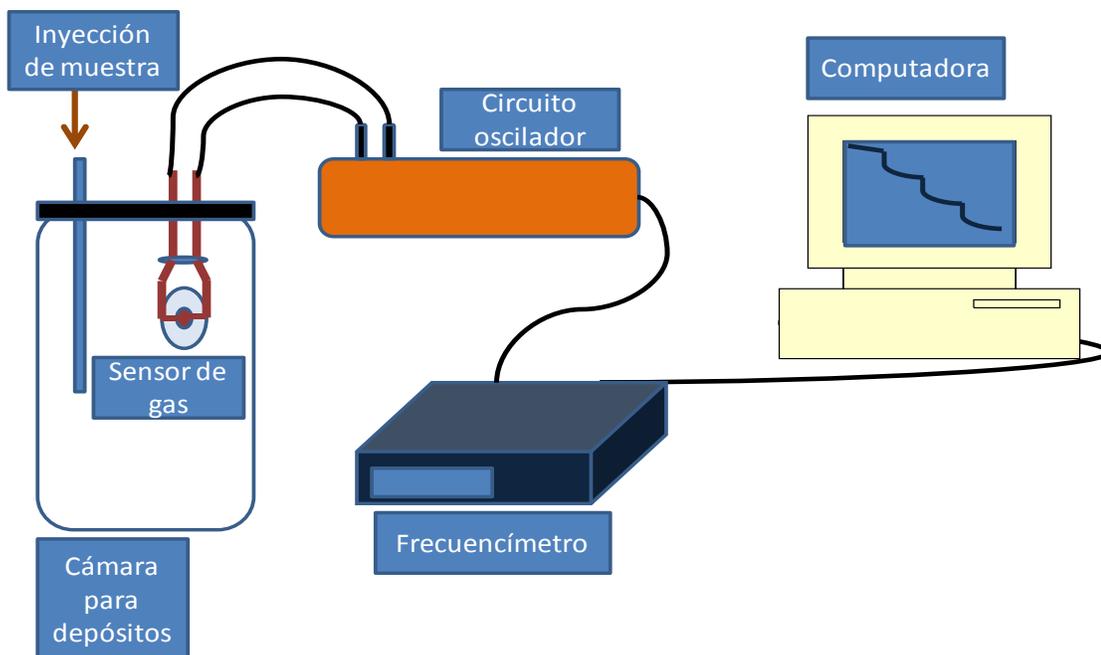


Figura 23. Diagrama del sistema con el que se cuenta para realizar medidas de concentración de gas en el laboratorio.

2) Se observan los valores obtenidos de la frecuencia y una vez que se mantenga estable la línea base, se realiza la primera inyección de 15 μl de etanol y se observa cómo disminuye la frecuencia. Luego se debe esperar a que esta frecuencia alcance el estado estable para hacer otra medición.

3) Se repite el proceso las veces que se desee. Para el objetivo de este trabajo se realizaron 3 inyecciones. Se obtiene una gráfica como la que se observa en la Figura 24.

4) Se mide la diferencia de frecuencias de las inyecciones y se relaciona con la diferencia en la concentración inyectada. Esto se realiza para cada temperatura.

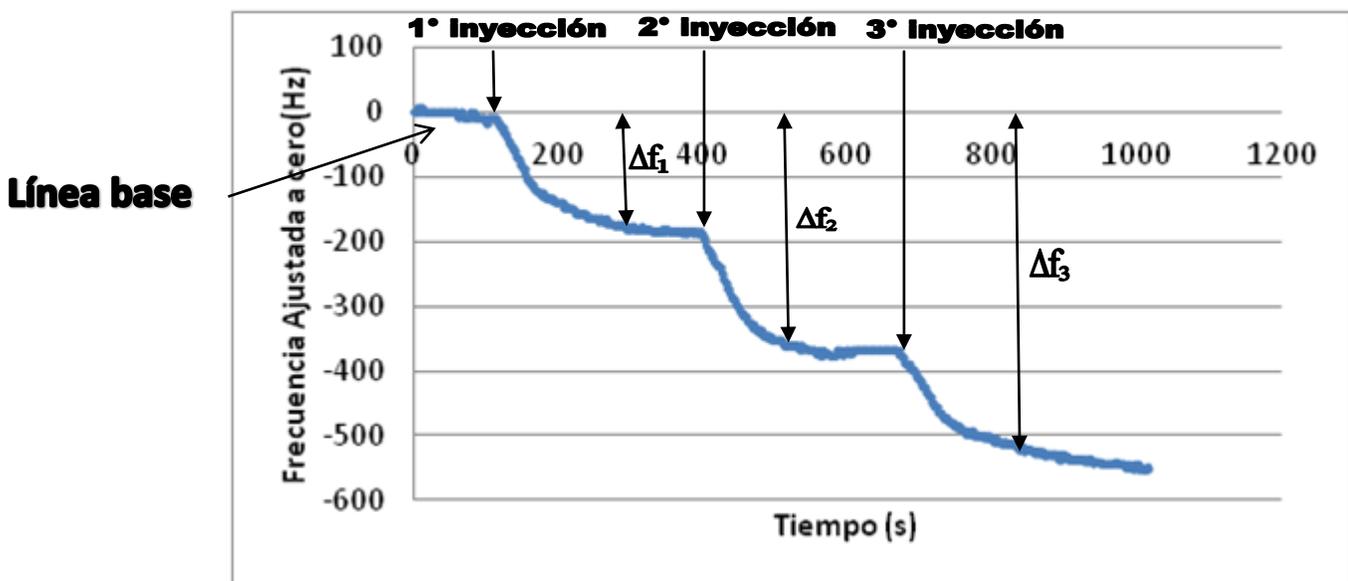


Figura 24. Muestra las diferencias de frecuencias durante cada inyección. Las deltas corresponden a las diferentes concentraciones de gas.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Sensor de temperatura.

El sensor de temperatura utilizado es el LM35 el cual tiene una respuesta de salida de 10 mV/°C. El voltaje de salida del sensor es enviado al pin AN0 para realizar conversión analógica digital dentro del microcontrolador PIC, así como las demás operaciones para obtener un valor de temperatura a la salida. Para realizar esta caracterización del sistema se sustituyó el sensor de temperatura por un divisor de voltaje (un potenciómetro) para controlar el voltaje de entrada y se registraron los valores que la LCD mostraba. Se consideró para este caso un voltaje de referencia de 5 V. Por lo que la temperatura máxima posible registrada es de 500 °C. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Voltaje (V)	Temperatura teórica (°C)	Temperatura en la LCD
0.001	0.1	0
0.499	49.9	46.9
1.001	100.1	97.6
1.516	151.6	148.4
2.065	206.5	201
2.498	249.8	246
2.999	299.9	296.9
3.505	350.5	347.6
4.01	401	400.3
4.512	451.2	451
5.003	500.3	497.9

Se realizó la gráfica de lo esperado teóricamente en función de lo experimental (Ver Figura 25) y se calculó su coeficiente de correlación, y su ecuación de la gráfica. Con la cual observamos que los valores teóricos son muy similares a los experimentales.

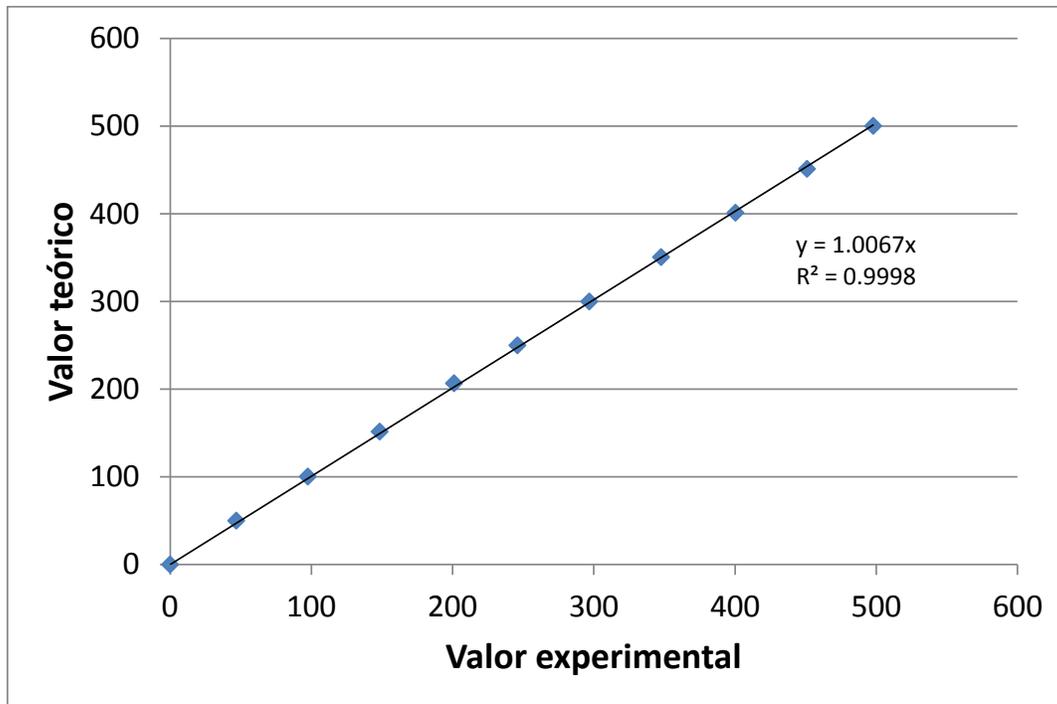


Figura 25.- Gráfica del valor obtenido teóricamente para la CAD contra el observado en la LCD después de realizar dentro del microcontrolador PIC todas las operaciones necesarias para obtener un valor de temperatura.

4.2 Película de los cristales.

Los resultados obtenidos de la fabricación de los cuatro cristales fueron los siguientes:

Cristal	Frecuencia sin película(MHz)	Frecuencia con película(MHz)	Δf_{pel} (MHz)
1	11.99834	11.97284	0.0255
2	11.99824	Perdido	----
3	11.99826	11.98352	0.01474
4	11.99821	11.97775	0.02046

Donde Δf_{pel} es el cambio de frecuencia producido en el cristal debido a la masa de la película sensible depositada.

Despejando ΔM de la ecuación (3) obtenemos:

$$\Delta M = \frac{A\Delta f}{-2.3 \times 10^{-6} f_0^2} \quad (9)$$

Se tiene el diámetro del cristal de 1 cm. Por lo tanto el área es de 0.785 cm². Sustituyendo este resultado y simplificando un poco tenemos:

$$\Delta M = -341.5 \times 10^3 \frac{\Delta f}{f_0^2} \quad (10)$$

Por lo tanto obtenemos las películas de los cristales como:

Cristal	f_0 (Hz)	Δf (Hz)	ΔM (μg)
1	11998340	25500	60.49
2	11998240	-----	-----
3	11998260	14740	34.97
4	11998210	20460	48.54

Se obtuvieron 3 sensores de gas, ya que uno no funcionó debido a que su respuesta después del depósito se fue a cero. Esto es debido posiblemente a una sobresaturación del cristal o a que el depósito se quedó estancado cerca de la zona de contacto entre los electrodos y el cristal.

Para el desarrollo inicial de este trabajo se trabajó con el sensor 4, debido a que su película tuvo una buena distribución en la superficie y su respuesta al momento de realizar mediciones fue buena.

4.3 Caracterización con respecto de la temperatura.

El proceso de caracterización se realizó para 8 temperaturas diferentes, de 5° a 40° C en pasos de 5°. Se realizaron pruebas de 3 inyecciones de 15 μl cada una. Para cada temperatura se realizaron 3 pruebas y se realizaron promedios de las diferencias de frecuencias para cada temperatura.

La Figura 26 muestra los resultados obtenidos de la caracterización de la respuesta del sensor a diferentes temperaturas.

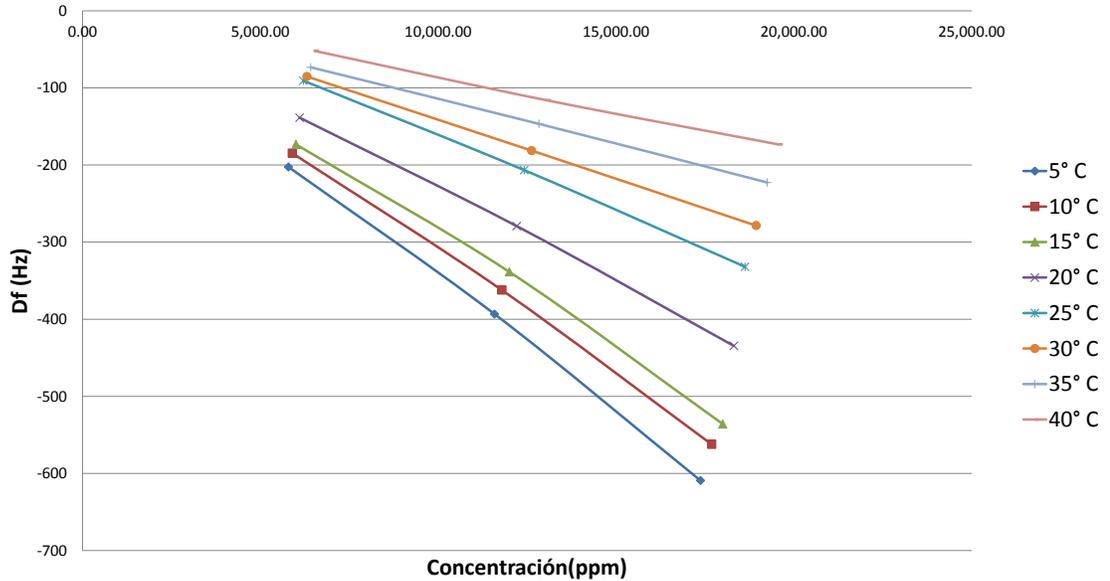


Figura 26.- Muestra las diferentes rectas para cada temperatura trabajada, en cada recta se grafica la diferencia de frecuencias contra la concentración de etanol.

Como se observa en la Figura 26, el decremento de frecuencia depende de la temperatura, mientras mayor es la temperatura menor es el decremento de frecuencia. Esto debido a que a altas temperaturas las partículas de gas están más aceleradas y tienden a desprenderse de la película sensible más rápidamente. Por lo tanto se puede afirmar que es importante considerar este parámetro en la medición de la concentración de gas.

Utilizando la ecuación (4) transformamos los valores inyectados en microlitros a ppm, y se realizó la gráfica de la concentración (en ppm) contra la diferencia de frecuencia. Esta se observa en la Figura 27. Esta gráfica nos va a permitir calcular la concentración compensada en temperatura.

Para tener un sensor de concentración lo que se mide es la diferencia de frecuencia, y a partir de esta se determina la concentración. Por lo tanto a la gráfica de la Figura 27 se le invierten los ejes con el fin de tener como variable independiente la diferencia de frecuencia. También se determina la ecuación de

cada recta para conocer la pendiente de la misma. Esta gráfica se observa en la Figura 28.

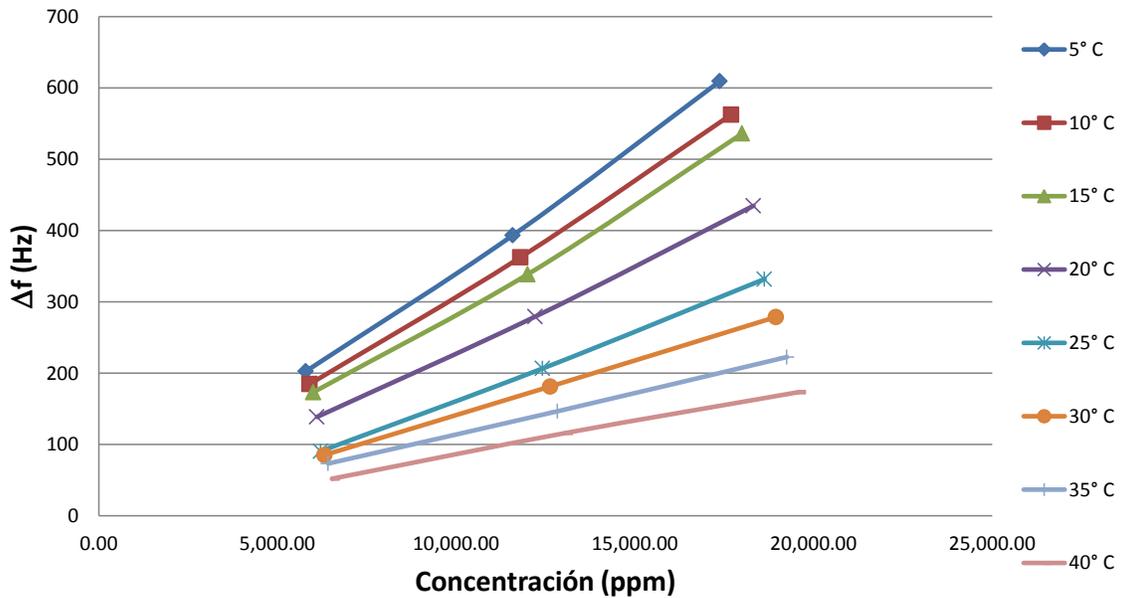


Figura 27 Gráfica que presenta la respuesta del sensor contra la concentración en ppm.

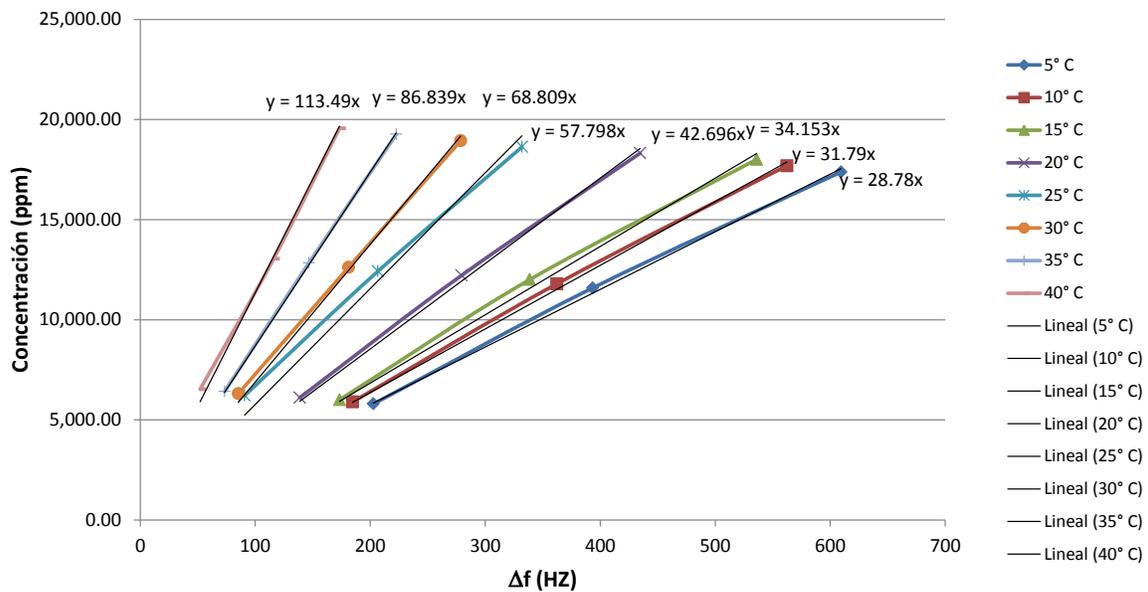


Figura 28.- Gráfica de la diferencia de frecuencia contra la concentración en ppm. Se muestra la ecuación de cada recta.

Se realizó una gráfica de la pendiente de cada recta en función de la temperatura, a esta gráfica se le realizó un ajuste cuadrático y se determinó su ecuación característica. Esta ecuación determina la pendiente de la recta correspondiente dependiendo de la temperatura a la que se trabaje. La gráfica se muestra en la Figura 29.

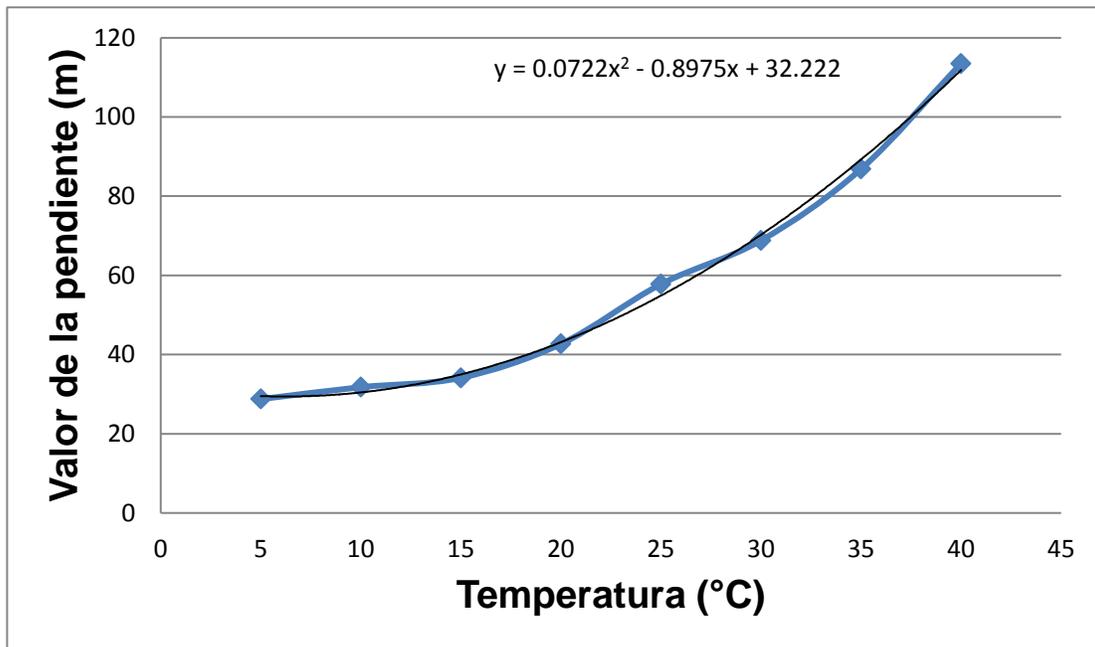


Figura 29.- Gráfica de la Temperatura contra la pendiente. Se muestra la ecuación de la curva.

Por lo tanto de la Figura 28 se obtiene que la ecuación de la pendiente dependiente de la temperatura es:

$$m = 0.0722T^2 - 0.8975T + 32.222 \quad (11)$$

Con las ecuaciones (6) y (11) es posible determinar la concentración de etanol en un sistema, midiendo la diferencia de frecuencia y la temperatura. La ecuación (11) es característica de cada sensor que se fabrique, por lo tanto esta debe ser determinada para cada cristal.

4.4 Medición de frecuencia.

Para la parte del medidor de frecuencia se conectó el generador de funciones, al pin T1CKI, se envió una señal cuadrada TTL y se observó la

frecuencia medida por el PIC, el resultado se observó en la LCD. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Generador de funciones (Hz)	Numero en la LCD
2000	2007
4000	4013
6000	6024
8000	8017
10000	10062
20000	20067
40000	40201
50000	50288
60000	60258

Se realizó una gráfica de la tabla anterior la cual se muestra en la Figura 30. En ella se observa que la respuesta del sistema es correcta con un valor de correlación igual a 0.9999, el cual no es exacto. Por lo tanto se puede decir que la aproximación es muy buena a lo esperado, y que nuestro medidor de frecuencia funciona adecuadamente.

4.5 Caracterización de un segundo sensor de frecuencia.

Para verificar el funcionamiento del sistema se utilizó un segundo cristal fabricado en el laboratorio, el cual tiene una película de 10.13 μg . La caracterización para este caso se realizó solo a tres temperaturas: 10°, 25°, 40° C. La gráfica de la caracterización se observa en la Figura 31. En la cual se tiene en el eje x la diferencia de frecuencia, y en el eje y la concentración en ppm.

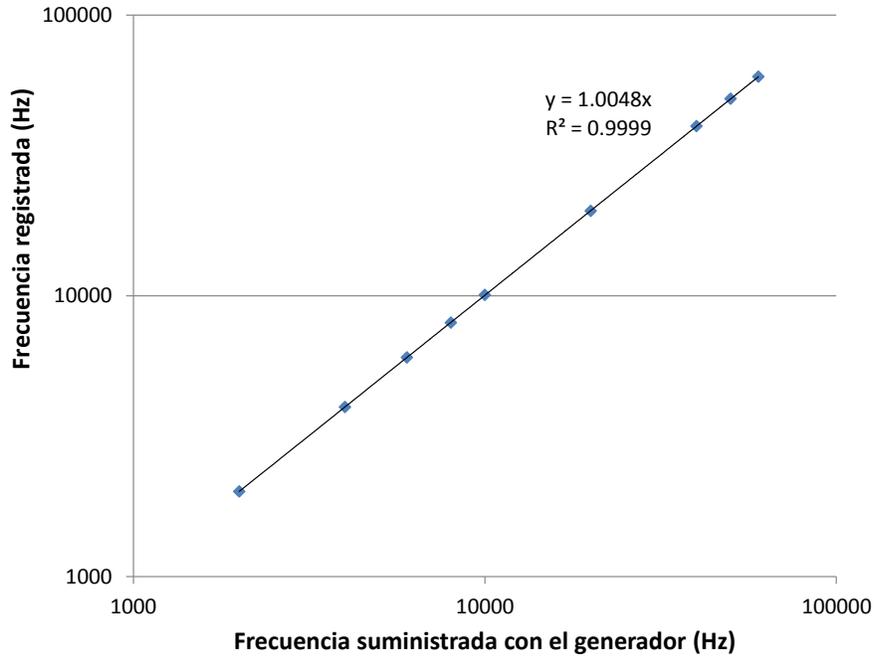


Figura 30.- Gráfica de la respuesta del frecuencímetro del PIC, a partir de la frecuencia producida por el generador de funciones.

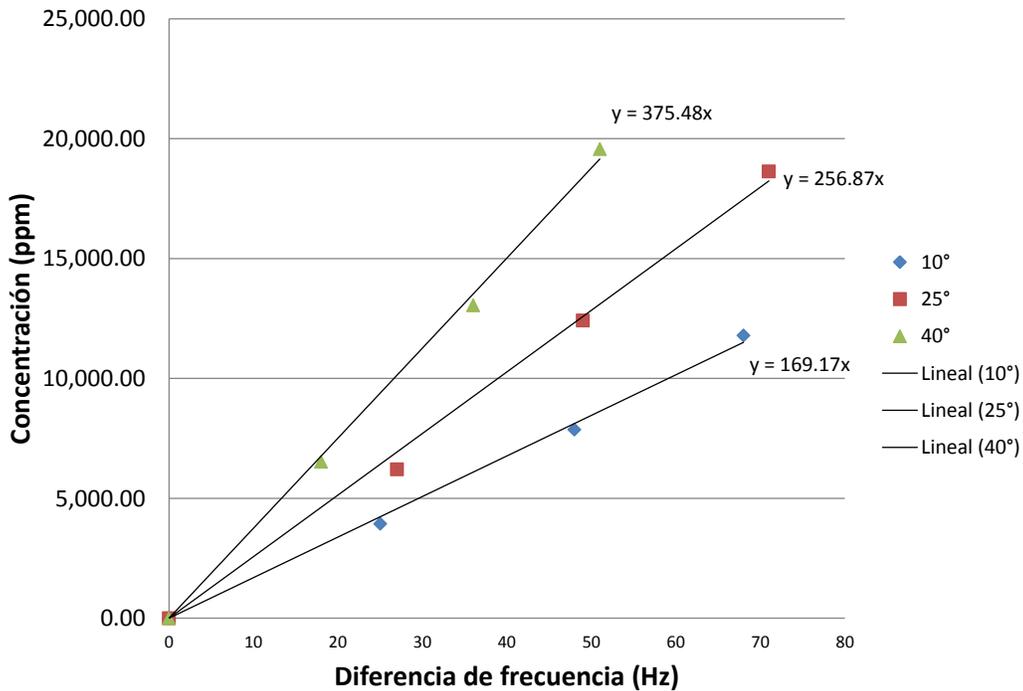


Figura 31.- Gráfica de la caracterización del segundo cristal con respecto de la temperatura.

Se realizó la gráfica de la temperatura contra las pendientes obtenidas anteriormente, esta gráfica se muestra en la Figura 32. En la cual también se le realizó un ajuste cuadrático como en el sensor anterior, y se determinó su ecuación característica.

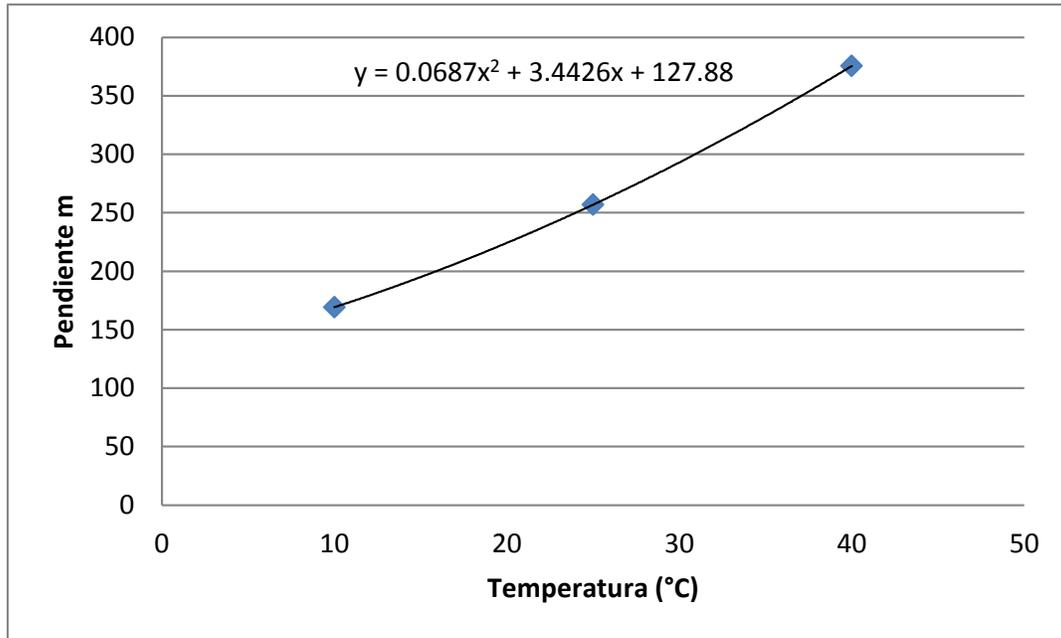


Figura 32.- Gráfica de la temperatura contra la pendiente de la recta de la gráfica de la Figura 24.

Para el segundo cristal la ecuación característica para determinar la pendiente es:

$$m = 0.0687T^2 - 3.4426T + 127.88 \quad (12)$$

4.6 Respuesta final del sistema.

Para verificar que el prototipo funciona correctamente, se realizaron dos mediciones de 3 inyecciones de 15 ml de etanol cada una, a 30 °C. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 33.

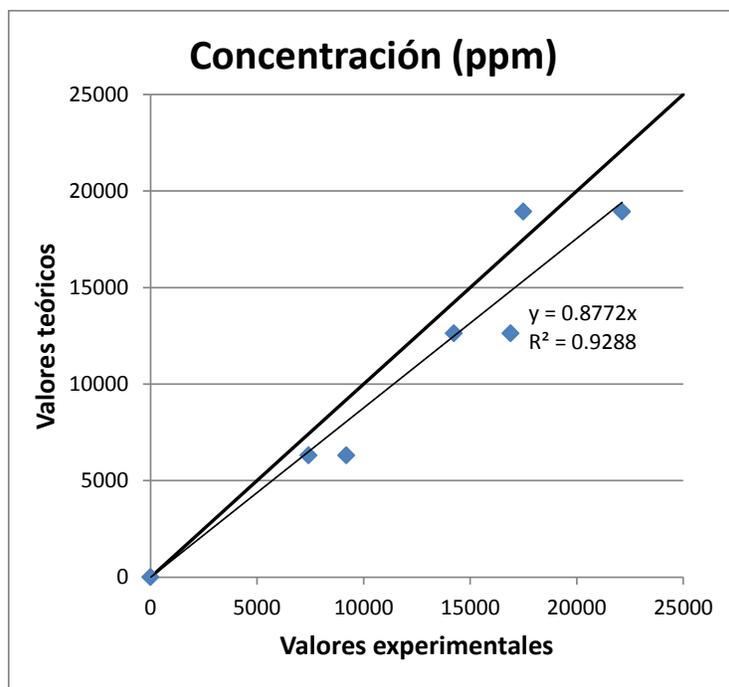


Figura 33.- Gráfica de la respuesta del prototipo creado en este trabajo, contra los valores teóricos esperados a 30 °C.

Como se observa, la línea recta más gruesa representa el valor ideal esperado del sistema, y la más delgada la aproximación lineal hecha de los valores experimentales obtenidos. Se observa que la desviación de la recta es muy pequeña, lo que indica que nuestros valores son muy parecidos a los esperados.

Dos de los factores importantes que influyen en la respuesta de este tipo de sensores son la humedad y la temperatura. La temperatura es uno de los factores que se logró compensar con este sistema. Como se observa de la Figura 27 y 30 en caso de que no se considerara este factor para una diferencia de frecuencia medida se pueden tener diferentes valores para la concentración. Por otro lado el factor humedad no ha podido ser compensado y quedará como trabajo a futuro.

Con lo mencionado sobre la humedad le adjudicamos a ésta la desviación de nuestra recta al momento de realizar las mediciones, puede ser que haya influido al momento de la caracterización o al momento de realizar las mediciones.

5. CONCLUSIONES

Se realizó el estudio de la dependencia de los sensores de gas con respecto de la temperatura.

Se encontró que la dependencia de los sensores de gas a la temperatura es un parámetro importante a considerar para realizar mediciones correctas de concentración. Y se caracterizó dicha respuesta para tener los valores precisos de concentración.

A bajas temperaturas el decremento en la frecuencia del cristal es mayor y en altas temperaturas es menor. Igualmente el error en medición es menor para altas temperaturas que para bajas temperaturas.

Es conveniente usar el sensor a altas temperaturas, aunque considerando que casi siempre se usa a temperatura ambiente, el rango de error dependerá de las condiciones del ambiente.

Cabe mencionar que el tiempo que tarda en estabilizarse el sensor fue mayor para las temperaturas bajas y menor para las altas. Por lo tanto mientras más alta sea la temperatura más rápido se estabiliza el sistema. Esto se debe a que entre más alta es la temperatura, más rápido se evapora el etanol y más rápido es detectado por el sensor.

Es posible reemplazar la función de la computadora por la LCD y el microcontrolador PIC programado con todas las funciones que contenía la computadora para este sistema.

La conversión analógico digital funciona correctamente, cualquier valor de voltaje que entre al microcontrolador PIC es convertido a número binario y luego dentro del microcontrolador PIC se transforma de binario a ASCII.

El sistema funciona correctamente, se pueden recibir datos, procesarlos y enviarlos para visualizarlos en la LCD.

Se reemplazó la computadora en el proceso de medir la concentración de gas, ahora se tiene un sistema portátil para la medición de experimental fuera del laboratorio.

Se construyó un sistema de detección de temperatura, y se sintetizó el sistema de medición de concentración de gas para poderlo trasladar y realizar mediciones fuera del laboratorio.

Podemos concluir que ya se simplificó el sistema significativamente y que ahora es un más práctico para manejarlo.

Se elaboraron y verificaron los diferentes programas desarrollados para tener una conversión de los valores de voltaje recibidos a valores de temperatura observados en la LCD.

Dentro de las ventajas de estos sensores encontramos que el cristal puede ser reemplazado por otro con otra película sensible para poder hacer mediciones de diferentes gases. Así, tendremos un sensor que mide concentración para diferentes gases.

Se puede determinar a partir de pruebas experimentales la ecuación característica $m(T)$ para cada cristal, esto dependiendo de la película que se le deposite.

El prototipo creado en este trabajo funciona correctamente y tiene una respuesta bastante cercana a la real, por lo que se considera funcional en su uso para la determinación de concentraciones en sistemas controlados.

5.1 Trabajo a futuro

- Desarrollar un método más rápido para determinar la ecuación $m(T)$ para cada cristal a utilizar.
- Determinar si esta ecuación es posible determinarla a partir del depósito de la película, ya que no solo depende del cambio de masa en el cristal, sino también de la distribución sobre la cara del cristal.
- Desarrollar un método para elaborar cristales con películas idénticas para así tener una sola ecuación para todos ellos.
- Desarrollar el prototipo en tarjeta impresa, por ahora solo se tiene armado en protoboard.
- Implementar el prototipo bajo condiciones fuera del laboratorio en condiciones no controladas.
- Realizar la caracterización y compensación del sistema dependiente de la humedad.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Antonio Arnau, Piezoelectric Transducers and Applications. Ed. Springer (2008)

[2] Microchip PIC16f87XA Data Sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers 2003 Microchip Technology Inc.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf>

[3] J. W. Garder and P.N. Bartlet, Electronic Noses, principles and applications, Oxford sciences (1999)

[4] Sensores. Ing. José Roberto Vignoni, 2003, Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de la Plata.

[5] A. L. Herrera, J. Martínez, P. J. García, L. García. Microsensores de gas: detección de partículas, Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad veracruzana Volumen XX Número 2
<http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol20num2/articulos/microsensores/index.html>

[6] López Casique A., Muñoz Aguirre S., Desarrollo de Sensores de Gas a Base de Resonadores de Cuarzo con Películas Poliméricas Depositadas por Atomización Ultrasónica., Tesis de Licenciatura, FCE – BUAP (2010)

[7] Ángeles Méndez, Etanol, propiedades y síntesis (2010),
<http://quimica.laguia2000.com/quimica-organica/etanol-propiedades-y-sintesis>

[8] C. A. Giudice y A. M. Pereyra, PROTECCIÓN DE MATERIALES, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata.

[9] QCM100 – Quartz Crystal Microbalance Theory and Calibration, Stanford Research Systems.

[10] D. Johannsmann (2008). "Viscoelastic, mechanical, and dielectric measurements on complex samples with the quartz crystal microbalance". *Physical Chemistry Chemical Physics* 10 (31): 4516–34. Bibcode:2008PCCP...10.4516J. doi:10.1039/b803960g. PMID 18665301

[11] LM35/LM135/LM335, LM135A/LM235A/LM335A Precision Temperature Sensors. <http://www.national.com/ds/LM/LM135.pdf>

[12] LCD MODULE SPECIFICATION FOR APPROVAL JHD162A <http://www.egochina.net.cn/eBay/Download/JHD162A.pdf>

[13] SN54HCU04, SN74HCU04 HEX INVERTERS SCLS079E – MARCH 1984 – REVISED MARCH 2004. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hcu04.pdf>

[14] Orlando Castro Magaña, Residencias Profesionales Junio-Agosto 2007, Sistema de adquisición para sensores de gas basados en cristales de cuarzo. ITESCA-BUAP.

[15] TIMERS TUTORIAL, MICROCHIP, 2007 Microchip Technology Inc.

[16] José Ma. Angulo Usategui, Susana Romero Yesa, Ignacio Angulo Martínez, Microcontroladores PIC Diseño práctico de aplicaciones (segunda parte) PIC16F87X, 3ra Edición.

[17] Tabla de Códigos ASCII, <http://ascii.cl/es/>

[18] José Ma. Angulo Usategui, Ignacio Angulo Martínez, Microcontroladores PIC Diseño práctico de aplicaciones (primera parte) PIC16F84, 3ra Edición.