



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

ESTUDIO DE LA RESPUESTA TRANSITORIA DEL SENSOR DE ESTADO SÓLIDO TGS-2620

TESIS

PRESENTADA AL

COLEGIO DE FÍSICA

**PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
LICENCIATURA EN FÍSICA APLICADA**

PRESENTA:

DAVID SILVA APANGO

ASESORES:

DR. SEVERINO MUÑOZ AGUIRRE

M. C. DIANA LIZETH OSORIO ARRIETA

PUEBLA, PUE.

AGOSTO DE 2015

Dedicatoria

Para mi madre Rosalía Apango López, en quien puedo confiar siempre. Por su notable esfuerzo en mi formación personal. Cuyas enseñanzas y consejos he guardado y procurado practicar siempre. Por haberme apoyado y motivado en todo momento para lograr mis objetivos. Por su amor demostrado en cada una de sus acciones.

Agradecimientos

A mi padre Francisco Silva Toscano por todo el apoyo que me ha dado.

A mis hermanos por la convivencia familiar que hemos tenido.

Al Ing. Rodolfo Díaz Pérez, por su tiempo y respaldo en las actividades académicas.

A mi asesor Dr. Severino Muñoz Aguirre por su abierta disposición y conocimiento brindado en el transcurso del trabajo de la tesis y en los estudios de la licenciatura.

A mi asesora M. C. Diana Lizeth Osorio Arrieta por su experiencia en el tema, instrumentación y colaboración en el presente trabajo.

Al M. C. Omar Mauricio Moreno Guzmán por su asistencia en los contratiempos encontrados durante el desarrollo del proyecto.

A la M. C. Teresa Pinto Rafael por el apoyo recibido en el laboratorio de optoelectrónica y los consejos prácticos sobre el uso del mismo.

Al M. C. Rafael Silva Íñiguez por su orientación y enseñanzas para mi decisión profesional.

A Marcos Rodríguez Torres, Marcos Ali Vásquez Reyes por su amistad y compañía en mis estudios.

A mis amigos y compañeros por todos los momentos vividos.

Título: Estudio de la respuesta transitoria del sensor de estado sólido TGS-2620.

Estudiante: David Silva Apango

COMITÉ

Dra. Georgina Beltrán Pérez

Presidente

Dr. Juan Castillo Mixcóatl

Secretario

Dr. Carlos Martínez Hipatl

Vocal

Dr. Oscar Méndez Zepeda

Suplente

Dr. Severino Muñoz Aguirre

Asesor

M. C. Diana Lizeth Osorio Arrieta

Asesora

Índice

Resumen.....	1
Capítulo 1	2
1. Introducción	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Marco teórico.....	3
1.2.1. Nariz electrónica.....	3
1.2.2. Sistema de orden cero	3
1.2.3. Sistema de primer orden.....	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos particulares	4
1.4. Sensores de gas	5
1.4.1. Tipos de sensores	6
1.4.2. Sensor TGS-2620	7
1.4.3. Respuestas de sensores	9
Capítulo 2	12
2. Desarrollo experimental.....	12
2.1 Descripción de materiales.....	12
2.1.1. Microcontroladores.....	12
2.1.2. El circuito integrado MAX232.....	15
2.1.3 Sensor de temperatura	16
2.1.4 Flujómetros	16
2.1.5 Baño térmico	17
2.1.6 Fuente de poder	17
2.2. Lenguaje ensamblador	17
2.3. Creación de la interfaz por medio de LabView	17
2.4. Ajustes de regresión con Minitab	17
2.5. Concentración de un gas.....	18
2.6 Ensamble del sistema.....	20
2.6.1. El sistema estático.....	23
2.6.2. El sistema dinámico.....	24
Capítulo 3	26

3. Resultados	26
3.1. Sistema estático	26
3.2. Velocidad de evaporación	29
3.3. Sistema dinámico	31
Capítulo 4	37
4. Análisis.....	37
4.1. Análisis de respuesta transitoria	37
4.2. Constante de tiempo.....	37
4.3. Coeficiente de ajuste.....	39
Conclusiones	44
Trabajo a futuro	45
Bibliografía	46

Resumen

El objetivo del proyecto es la implementación de un sistema para medir la respuesta transitoria de un sensor de estado sólido TGS-2620 al etanol. Este sistema se empleará para verificar el modelo de un sistema de primer orden. Es importante realizar la caracterización de la respuesta transitoria ya que esta representa la respuesta dinámica del sensor cuando se aplica un estímulo en el monitoreo del medio ambiente.

Un bloque importante del proyecto que se utilizó es el microcontrolador PIC o Peripheral Interface Controller. Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de un computador y se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada. Para medir la respuesta del sensor TGS-2620 se utilizó el PIC-16F877A ya que este cuenta con módulos tales como varios temporizadores, un conversor analógico digital y comunicación serial.

En la primera etapa de este trabajo se caracterizó la velocidad de evaporación del etanol contenido en un vial para poder calcular la concentración de una muestra de etanol y se encontró que esta tiene un comportamiento lineal por lo que se puede decir que la concentración de etanol es constante en un lapso de tres horas ya que este fue el tiempo que se le dio a la evaporación. Se caracterizó la respuesta del sensor TGS-2620 en el sistema estático y se encontró que se comporta de manera exponencial, lo cual corresponde a los datos del fabricante.

Se realizaron mediciones en un sistema dinámico para caracterizar el tiempo de respuesta en su estado transitorio para posteriormente analizar y ajustar a un sistema de primer orden. De esta forma se pretende predecir la respuesta en estado estable del sensor a partir de la respuesta transitoria, midiendo unos cuantos puntos al inicio de la respuesta transitoria.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Nuestro entendimiento del proceso olfativo se ha incrementado en los últimos años y ha habido intentos para modelar este proceso pero los detalles son desconocidos. Se cree que las células olfatorias receptoras tienen baja sensibilidad (\approx ppm), baja selectividad y una vida media aproximada de 22 días. Aun así los procesos neuronales siguientes aumentan la sensibilidad aproximadamente tres órdenes de magnitud, remueve el corrimiento y provee la discriminación entre varios miles de olores [1].

La mayoría de los aromas naturales, perfumes y sabores son complejas combinaciones de especies químicas y contienen cientos o quizás miles de componentes. Con frecuencia diferencias sutiles en las cantidades relativas de estos componentes determinan el aroma de un producto.

La nariz humana todavía es un instrumento importante usado para evaluar el olor de varios productos industriales. Este es un proceso costoso debido a que es necesaria la labor de expertos entrenados que solamente pueden trabajar por periodos relativamente cortos de tiempo. Aunque la nariz humana es un gran apoyo en diversas tareas tiene el inconveniente de no ser precisa, necesitan de un ambiente preparado en algunos casos y además se necesita tener el cuidado de evitar compuestos tóxicos ya que podría haber consecuencias graves a exposiciones que contengan elevadas concentraciones o extensos tiempos de exposición.

Las propiedades físico-químicas de los productos también son medidas usando equipo analítico convencional. Estos métodos mecánicos consumen mucho tiempo y ofrecen resultados inadecuados ya que en algunas ocasiones los elementos clave de un producto se encuentran por debajo de los límites de detección. Tampoco se tiene la seguridad sobre la existencia de una relación entre las propiedades físico-químicas de las moléculas de olor y el impacto sensorial que poseen.

El trabajo más antiguo sobre el desarrollo de un instrumento específicamente hecho para detectar olores podría datarse probablemente a Moncrieff en 1961, la cual era una nariz mecánica [2]. Las primeras narices electrónicas fueron reportadas por Wilkens y Hatman en 1964 [3]. Sin embargo, el concepto de una nariz electrónica como un arreglo de sensores químicos para la identificación

de olores no salió a la luz hasta después de veinte años con Persaud y Dodd [4] y no fue hasta finales de la década de los ochenta cuando se acuñó el término de nariz electrónica usado por primera vez en una conferencia en 1987. Finalmente la primera conferencia dedicada al tema de las narices electrónica fue celebrada en 1990 [5].

Ha habido intentos para modelar la respuesta transitoria en los sensores de gas, por medio de sumas de dos decaimientos exponenciales [6], o de decaimientos multi-exponenciales [7]. Uno de los métodos usados para realizar predicciones de la respuesta transitoria es el de reservoir computing (RC), en el que se compara una señal de entrada a una base de datos y asignar una señal de salida deseada [8]. Anteriormente se observó que el sensor TGS-2620 tiene un comportamiento de un decaimiento exponencial, esto facilita el análisis de los datos obtenidos para encontrar predicciones sin usar bases de datos [9].

1.2. Marco teórico

En esta sección se explica el funcionamiento de una nariz electrónica y los modelos matemáticos que nos permiten explicarlo, además de los distintos métodos de detección de gases y las características con las que cuentan los diferentes tipos de sensores.

1.2.1. Nariz electrónica

Se han fabricado distintos tipos de aparatos que emulan los sentidos del ser humano con el fin de cuantificar o reproducir estímulos de una manera más confiable. Uno de estos dispositivos es la nariz electrónica. Esta se compone básicamente de tres partes: El arreglo de sensores, los dispositivos de procesamiento y los algoritmos de interpretación.

Es importante tener algoritmos de interpretación que nos den un análisis rápido sobre los estímulos externos para obtener una reacción rápida de los sistemas que dependen de ellos. En este trabajo se desarrolla la predicción del estado estable por medio del estudio de la respuesta transitoria a diferentes concentraciones de etanol en un ambiente controlado.

1.2.2. Sistema de orden cero

Un sensor de orden cero es aquel cuya salida está relacionada con la salida mediante la Ec. 1.

$$y(t) = k x(t) \quad \text{Ec. 1}$$

por lo que su comportamiento queda caracterizado por su sensibilidad estática k , se mantiene constante e independiente a la frecuencia de entrada. De esa forma, tanto un error dinámico como su retardo son nulos. Para que la relación de entrada-salida sea de la forma indicada por la

ecuación anterior, es necesario que el sensor no incluya ningún dispositivo almacenador de energía.

1.2.3. Sistema de primer orden

En un sistema de primer orden hay un elemento que almacena energía y otro que la disipa. La relación entre la entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ viene dada por la Ec. 2.

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad \text{Ec. 2}$$

Para encontrar la función de transferencia necesitaremos aplicar la transformada de Laplace

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_1 s + a_0} \quad \text{Ec. 3}$$

Recordando que la sensibilidad estática está dada por $k = 1/a_0$ y la constante de tiempo del sistema como $\tau = a_1/a_0$ se deduce la Ec. 4 que se conoce como la función de transferencia.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad \text{Ec. 4}$$

El sistema queda caracterizado por dos parámetros k para la respuesta en estado estable y τ para la respuesta dinámica. Si se aplica a este tipo de sistemas una entrada escalón unitario $x(t) = u(t)$ cuya transformada de Laplace es $X(s) = 1/s$ al sustituir este último en la función de transferencia y separando en fracciones parciales se obtiene la Ec. 5.

$$Y(s) = \frac{k}{s} - \frac{k}{s + 1/\tau} \quad \text{Ec. 5}$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace a cada uno de los términos se encuentra la respuesta en el tiempo a una entrada escalón.

$$y(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

1. Comprobar el modelo del sensor TGS-2620 a partir de un sistema de primer orden y a partir de este modelo obtener predicciones rápidas del estado estable

1.3.2. Objetivos particulares

1. Configuración de un conversor analógico digital.

2. Configuración de la comunicación entre el microcontrolador y una computadora.
3. Caracterización de la velocidad de evaporación en el sistema.
4. Caracterización del sensor TGS-2620 a diferentes concentraciones.
5. Medición de la respuesta del sensor a un estímulo tipo escalón.
6. Análisis de datos por medio del Algoritmo Gauss-Newton para hallar las constantes de tiempo del modelo.

1.4. Sensores de gas

Recientemente se ha incrementado el uso de sensores de gas en varios sistemas inteligentes con fines tanto a fines industriales como académicos. Los cuales se emplean para la detección de compuestos tóxicos contaminantes en el ambiente [10], la simulación del sistema olfativo humano [11], supervisión de la calidad del aire en interiores [12], control de calidad en los alimentos [13], estudios ambientales [14]. Las tres mayores áreas que reciben atención son la investigación de diferentes tipos de sensores, principios de detección y técnicas de fabricación [15].

Para evaluar el rendimiento de los métodos de detección de gas, se necesita considerar varios factores:

- Sensibilidad: Es el cambio en la respuesta del sensor en función del cambio en la variable medida.
- Selectividad: La habilidad del sensor de identificar un gas específico entre una mezcla.
- Tiempo de respuesta: El lapso que tarda un sensor desde el tiempo cuando una concentración de gas alcanza un valor específico al que el sensor genera una señal de aviso.
- Consumo de energía: al disminuir el valor de este indicador se puede disminuir costos y aumentar la eficiencia del circuito al que el sensor se integre.
- Reversibilidad: La propiedad de que los materiales puedan regresar al estado original después de una exposición.
- Capacidad de adsorción: la eficiencia del material para retener partículas de olor en su superficie, esta también puede afectar la sensibilidad y selectividad.

Además de lo mencionado anteriormente los sensores de gas disponibles en el mercado deben garantizar la estabilidad de su operación, es decir, deben presentar señales estables y

reproducibles por un periodo de tiempo determinado. Hay varios factores que encaminan a un sensor a la inestabilidad como [16]:

- Errores de diseño.
- Cambios estructurales.
- Cambios de fase.
- Cambio de composición provocado por reacciones químicas.
- Variación del ambiente circundante.

Para evitar estos problemas se pueden usar los siguientes métodos:

- Usar materiales con estabilidad química y térmica.
- Optimizar la composición elemental.
- Utilización de tecnología específica durante el tratamiento de la superficie del material de los sensores.
- El control sobre la humedad del aire.

1.4.1. Tipos de sensores

Existen diversos métodos para la detección de gas que pueden desempeñarse adecuadamente en distintos campos de aplicación. Entre ellos encontramos los sensores que usan polímeros como material sensible, entre sus ventajas se encuentran una alta sensibilidad, un periodo de respuesta corto, una estructura simple y portátil que se refleja en sus bajos costos de fabricación además de un bajo consumo de energía y la posibilidad de producción reproducible [17]. El problema que estos dispositivos conllevan es el de una inestabilidad a largo plazo, irreversibilidad y una selectividad pobre. Estos sensores pueden emplearse para el monitoreo ambiental en interiores, inspección de almacenes para productos sintéticos así como en industrias químicas [18].

Por los métodos ópticos se obtiene una alta sensibilidad, selectividad y estabilidad. Además de un tiempo de vida largo y la insensibilidad a los cambios ambientales. Las desventajas que estos dispositivos poseen son la dificultad para la miniaturización y su alto costo. Las tareas a las que estos sensores se dedican son el monitoreo remoto de la calidad del aire, sistemas de detección de fugas de gas de gran precisión y seguridad, además de aplicaciones para el mercado de gama alta [19].

Con los cromatógrafos de gases existe un excelente rendimiento de separación de sustancias junto con una selectividad y sensibilidad altas. Sin embargo, poseen un alto costo y la dificultad para miniaturizar los aparatos en aplicaciones portátiles así que son usados como componentes para análisis típicos de laboratorio [20].

El sensor que se usó en este trabajo es del tipo semiconductor de óxido metálico, esta es la categoría más común y tienen varias ventajas como bajo costo y alta sensibilidad. Generalmente los óxidos metálicos pueden ser clasificados en dos tipos: de no transición y transición. El primero contiene elementos con solo un estado de oxidación ya que se requiere de mucha energía para formar otros estados de oxidación, un ejemplo de este grupo es la alúmina (Al_2O_3). La segunda categoría contiene más estados de oxidación, por lo que forma varios estados de oxidación en la superficie del material.

Al ser un sensor comercial de óxido metálico el que se usó en este trabajo se tienen varias de las ventajas anteriores por lo que es más sencillo enfocar los esfuerzos a la respuesta transitoria. A pesar de esto deben de tomarse algunos factores para obtener unas respuestas confiables. Se sabe que los sensores que pertenecen a esta categoría son sensibles a factores ambientales. Otras de las desventajas que presentan estos sensores son un alto consumo de energía [21] y una relativamente baja selectividad [22], [23]. En particular el sensor TGS-2620 presenta ventajas como un tiempo de respuesta corta y una alta sensibilidad al etanol, además al ser un producto comercial podemos conocer su comportamiento sin haberlo caracterizado antes. Por tales motivos en este trabajo de tesis será utilizado.

1.4.2. Sensor TGS-2620

Fabricado por la empresa Figaro, el elemento sensitivo de este dispositivo está compuesto de un óxido metálico semiconductor formado por un sustrato de alúmina, una placa de detección junto a un calefactor integrado. En la Figura 1 presenta el estado físico del sensor, mientras que en la Figura 2 se ve el esquema de conexiones, los pines que tienen los números 1 y 4 del calefactor no tienen polaridad.

En la presencia de un gas detectable la conductividad incrementa dependiendo de la concentración del gas en el aire. Un circuito eléctrico simple puede convertir el cambio en la conductividad a una señal de salida que corresponda al cambio de concentración. Además del etanol, este sensor también tiene una alta sensibilidad a los vapores de solventes orgánicos tales

como el metano o el Iso-butano así como otros compuestos volátiles. Debido al material de detección, el TGS-2620 requiere un calefactor con un consumo eléctrico de 210 mW.



Figura 1 Sensor TGS-2620 [24].

El aumento y el descenso del voltaje del sensor tienen una importancia crítica en la respuesta de un sensor como el TGS-2620. Podemos dividir las respuestas de este sensor en dos grandes partes [25], la primera consiste en una respuesta al encendido inicial en la que el calefactor integrado comienza a funcionar hasta llegar a una temperatura que se encuentra aproximadamente entre 300° C y 400° C. La parte de la respuesta dinámica del encendido inicial se descarta ya que no provee información sobre el estímulo del compuesto que se va a ocupar. Es por esto que se recomienda mantener el sensor encendido tiempo antes de comenzar a detectar los compuestos.

La otra parte de la respuesta del sensor se debe a la detección de un gas que modifica el valor de la resistencia, con lo que la corriente del material del sensor, cambia el voltaje del dispositivo. Las mediciones útiles se obtienen después de llegar a la temperatura apropiada del calefactor del sensor y por la adsorción del gas por parte del sensor. El estado estable del sensor se alcanza cuando el voltaje de salida alcanza un valor constante.

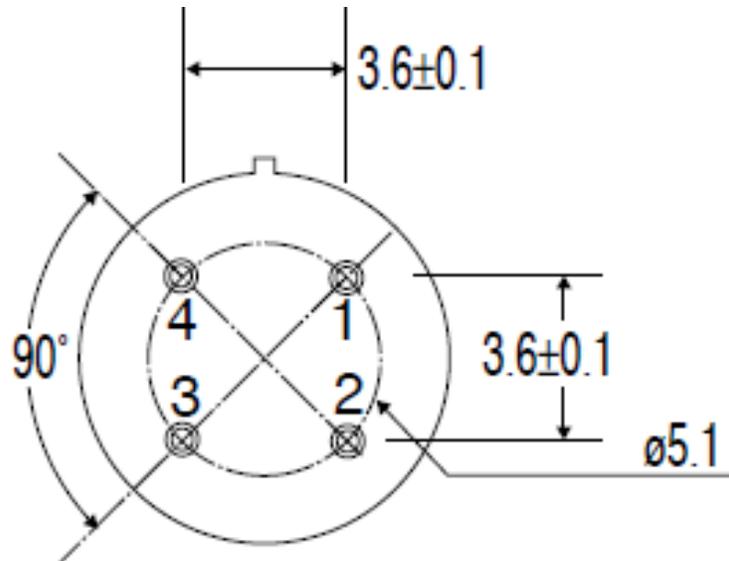


Figura 2 Esquema de conexión de pines 1) Calefactor. 2) Electrodo negativo. 3) Electrodo positivo. 4) Calefactor [24]

Debido a la respuesta y disponibilidad de los sensores de alúmina son usados en las narices electrónicas. No obstante, por su tiempo de recuperación lento, corrimiento por los cambios de humedad y temperatura en el ambiente y la potencia de consumo son las principales desventajas con las que cuenta este tipo de sensor.

Las pendientes de la subida y bajada de la curva de respuesta del sensor desempeñan un papel importante en la detección del olor y su rendimiento. Se sabe que el sensor TGS-2620 funciona con un modelo de primer orden, este modelo contiene una respuesta transitoria que puede entenderse como la manera en la que la respuesta dinámica del sensor cambia de un estado de concentración a otro mientras que el estado estable es cuando la respuesta del sensor llega a un valor constante.

1.4.3. Respuestas de sensores

En la Figura 3 a) se presenta un estímulo de una función escalón ideal con una amplitud $(y_s - y_0)$ con una duración de tiempo t . Dentro del sistema se supone que hay una entrada que se comporta como una función escalón que provocará una reacción en la salida como la Figura 3. b), en donde se notan cuatro divisiones, la primera (I) se trata de la respuesta transitoria que sigue el comportamiento marcado por la constante de tiempo τ . La segunda parte (II) se trata de un complemento de la respuesta en aumento. Cuando transcurre un tiempo igual a 5τ suponemos que el valor de las lecturas es constante por lo que podemos hablar del estado estable en la región (III)

que tiene una magnitud $\Delta y = y_s - y_0$. Al final se encuentra la región de recuperación (IV) que sucede cuando se retira el estímulo del sensor.

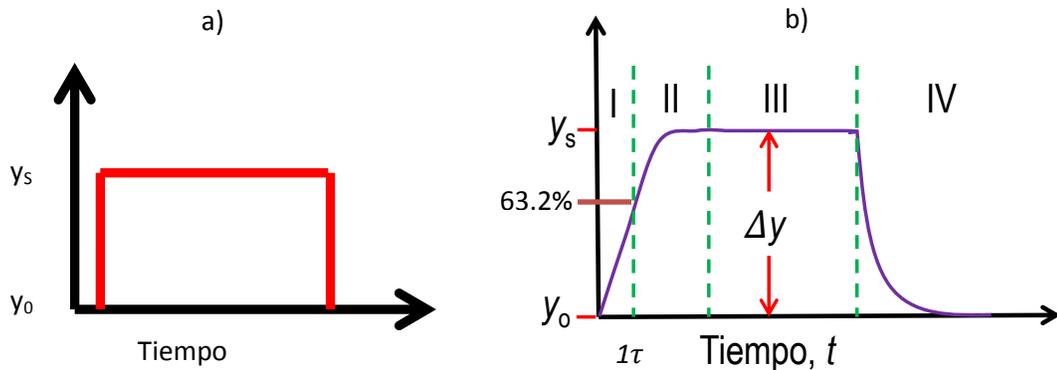


Figura 3. a) Estímulo de entrada como una función escalón. b) Respuesta de salida del sensor.

Entonces el modelo de respuesta de un sensor puede dividirse en dos partes: la respuesta transitoria y en el estado estable. La respuesta transitoria es el lapso en el que el sensor comienza a reaccionar con el gas. El estado estable sucede teóricamente cuando $e^{-t/\tau}$ tiende a cero ($t \rightarrow \infty$), siendo τ la constante de tiempo del sensor. De manera práctica esto sucede cuando la función exponencial se vuelve despreciablemente pequeña, es decir, cuando $t = 5\tau$ por lo que se tiene el valor $e^{-t/\tau} < 0.01$ [9].

El modelo se puede definir como en una función exponencial de acuerdo a la Ec. 7.

$$R = R_1(1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{Ec. 7}$$

$$= R_1 - R_1 e^{-t/\tau} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde el componente de la izquierda es el del estado estable y la constante de tiempo τ es el componente transitorio.

Al derivar y evaluar la derivada en el tiempo igual a cero tenemos la Ec. 9.

$$R_1 = \tau \left. \frac{dR}{dt} \right|_{t=0} \quad \text{Ec. 9}$$

Lo que nos da la predicción de que el estado estable es igual al tiempo τ multiplicado por la pendiente de la función cuando es cercana a cero. Esto nos da la posibilidad de conocer la reacción de un sensor tiempo antes de que alcance su estado estable [6]. Al calcular la primera derivada de

la señal se incrementa el ruido pero ese no es generalmente un problema para los sensores de gas. La constante de tiempo τ es a menudo una cantidad variable que depende de la muestra de gas.

Si expandimos la función exponencial mediante una serie de Taylor, alrededor de cero, está puede ser escrita como:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad \text{Ec. 10}$$

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots, \quad \text{Ec. 11}$$

Al tener valores pequeños de x ($x \ll 1$) podemos llegar a buenas aproximaciones de la función exponencial si solo tomamos los primeros dos términos de la suma en la Ec. 11. Si hacemos la sustitución en la Ec. 7 tendremos:

$$R = R_1 \frac{t}{\tau} \quad \text{Ec. 12}$$

Particularmente si consideramos que $x \sim 0.1$, entonces:

$$x = -t/\tau \sim 0.1 \quad \text{Ec. 13}$$

Por lo tanto $\left. \frac{dR}{dt} \right|_{t=0}$ puede determinarse al evaluar el comportamiento de R (Ec. 7) durante tiempos del orden de 0.1τ . Esto último significa básicamente que puede obtenerse una estimación de la concentración 50 veces más rápido.

Capítulo 2

2. Desarrollo experimental

En esta sección se tratarán los dispositivos usados en el experimento así como las características y herramientas que nos ofrecen para llevar a cabo el trabajo asignado en este proyecto.

2.1 Descripción de materiales

2.1.1. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene varias características de una computadora pero a una escala más pequeña y con prestaciones limitadas si las comparamos con esta última. Los microcontroladores se emplean para controlar el funcionamiento de tareas determinadas. Debido a su reducido tamaño suelen estar incorporados a los dispositivos portátiles

Los microcontroladores son unas computadoras dedicadas a una tarea. En sus memorias solo se encuentra un programa reservado a controlar una aplicación determinada. Las líneas de entrada y salida que poseen, soportan las conexiones de los sensores, actuadores, circuitos integrados o recursos complementarios que podrían atender los requerimientos necesarios para algún fin específico. Ya programado y configurado el microcontrolador solamente funciona para dirigir la tarea asignada.

Para diferenciar un microprocesador de un microcontrolador podemos pensar en que el primero es un sistema abierto con el que puede ensamblarse una computadora con las características que el usuario desea al conectar los módulos necesarios, mientras que el segundo ya contiene una computadora completa y de prestaciones determinadas que no se pueden cambiar [26].

2.1.1.1. El PIC-16F877A

El PIC-16F877A (Figura 4) [27] pertenece a un conjunto de microcontroladores PIC de la gama media que tiene incluida una memoria FLASH capaz de soportar 1000 ciclos de escritura y borrado de programas. Además tiene algunos recursos semejantes a modelos más potentes. Las características con las que cuenta el PIC-16F877A son las siguientes:

- Procesador de arquitectura RISC avanzada.
- Juego de 35 instrucciones con 14 bits de longitud.
- Frecuencia de 20 MHz.

- 8K palabras de 14 bits para la memoria de código tipo FLASH.
- 368 bytes de RAM.
- 256 bytes de EEPROM.
- 14 fuentes de interrupción internas y externas.
- Código de protección programable.
- Modo Sleep de bajo consumo.
- Voltaje de alimentación comprendido entre 2 y 5.5 V.
- Bajo consumo, menos de 2 mA a 5 V y 5 MHz.

Mientras que sus dispositivos periféricos son los siguientes:

- Tres temporizadores
- Dos módulos de captura-comparación-PWM (Modulador de Ancho de Pulso)
- Conversor Analógico Digital de 10 bits
- Puerto Serial Síncrono (SSP)
- Receptor-Transmisor Universal Asíncrono (USART)
- Puerta Paralela Esclava (PSP)

De estas herramientas las que se usaron fueron los temporizadores, el conversor analógico digital y la comunicación medio del Receptor-Transmisor Universal Asíncrono.



Figura 4. PIC-16F877A [32].

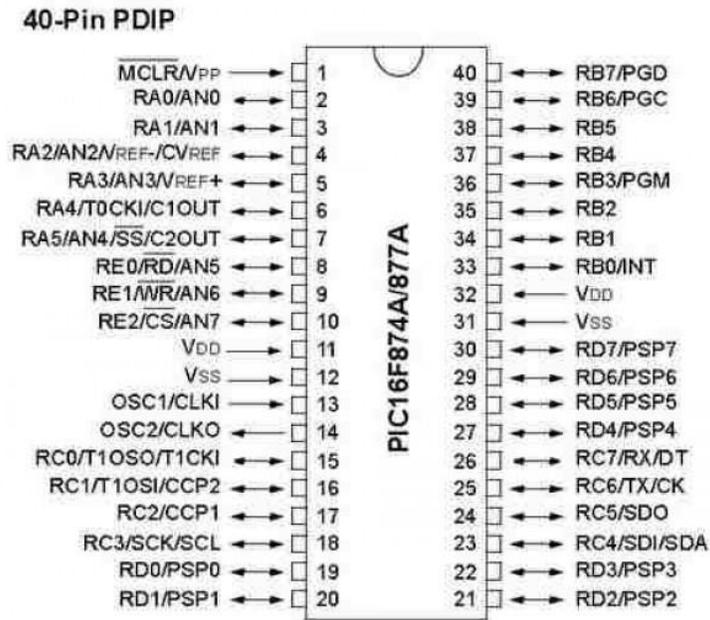


Figura 5. Diagrama de conexión de pines del PIC-16F877A [32].

2.1.1.2. El Conversor Analógico-Digital

Los microcontroladores PIC16F877 poseen un conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits de resolución y 8 canales de entrada. La resolución que tiene cada bit procedente de la conversión tiene un valor que es función del voltaje de referencia V_{ref} , de acuerdo con Ec. 14.

$$Resolucion = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{1024} = \frac{V_{ref}}{1024} \quad \text{Ec. 14}$$

En el presente trabajo la V_{ref+} fue de 5 VDC y la V_{ref-} fue tierra, por lo que la resolución fue de 4.8 mV por bit. A través del canal de entrada seleccionado, se aplica la señal analógica a un condensador de captura y almacenamiento, luego se introduce al conversor, el cual proporciona un resultado digital de 10 bits de longitud usando la técnica de aproximaciones sucesivas. El pin de entrada para el voltaje de medida que se usó es el número 2 de la Figura 5.

2.1.1.3. La comunicación al puerto serial

La comunicación serial se realiza mediante el módulo USART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), llamado SCI (Serial Communications Interface) y puede funcionar como un sistema de comunicación bidireccional asíncrono, adaptándose a varios dispositivos que

transfieren datos de esta forma como una PC. También puede trabajar en modo síncrono unidireccional tanto en recepción como en transmisión.

En la Figura 6 se muestra un esquema del comportamiento del USART en modo asíncrono, las transferencias de información se realizan sobre dos líneas TX (transmisión) y RX (recepción), en los pines RC6 y RC7 saliendo y entrando los bits por dichas líneas al ritmo de una frecuencia controlada internamente por el USART. En esta forma de comunicación serial se usa la norma RS-232-C, cada dato se envía independientemente del resto. Suelen estar formados por 8 o 9 bits teniendo por delante un bit de START (inicio) y detrás de ellos. Según la Figura 5 los pines usados en el PIC para transmisión y recepción de datos son el 25 y 26 respectivamente, uno de finalización (STOP).

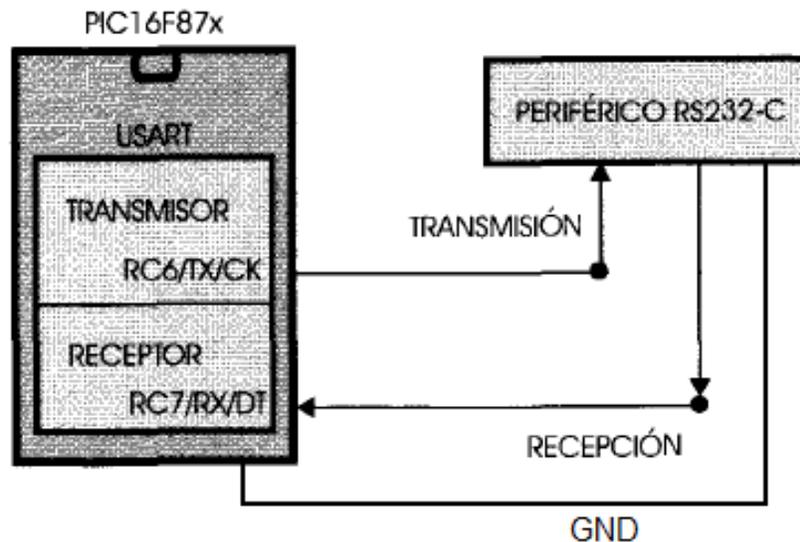


Figura 6. Esquema del modo de comunicación asíncrona del USART [27].

2.1.2. El circuito integrado MAX232

El acoplamiento entre el microcontrolador y la computadora se realiza con el circuito integrado MAX232 que convierte las señales de un puerto serial a señales compatibles con los niveles de circuitos lógicos. El MAX232 sirve como interfaz de transmisión y recepción para las señales RX, TX como se muestra en la Figura 7.

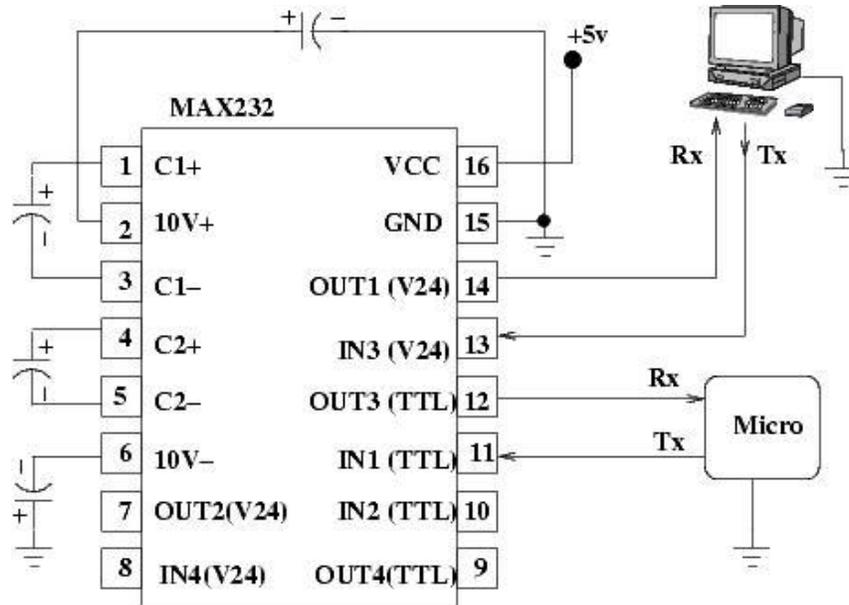


Figura 7. Diagrama de conexión para comunicación de puerto serial.

El circuito integrado tiene salidas para manejar niveles de voltaje del RS-232 (aprox. ± 7.5 V) que las produce a partir de un voltaje de alimentación de + 5 V utilizando multiplicadores de voltaje internamente en el MAX232 con la adición de condensadores externos. Esto es de mucha utilidad para la implementación de puertos serie RS-232 que trabajan con señales TTL [28].

Las entradas de recepción de RS-232 (las cuales pueden llegar a ± 25 V), se convierten al nivel estándar de 5 V de la lógica transistor a transistor. Estos receptores tienen un umbral típico de 1.3 V, y una histéresis de 0.5 V.

2.1.3 Sensor de temperatura

Para medir la temperatura del recipiente en el que se lleva a cabo la evaporación del etanol se usa un termopar conectado al multímetro Wavetek Meterman 23 XT. Este puede mostrar las siguientes escalas con su respectiva precisión [29]:

-20°C a 200°C: $\pm(1.0\% \text{ lect} + 2^\circ\text{C})$

200°C a 750°C: $\pm(3.0\% \text{ lect} + 2^\circ\text{C})$

2.1.4 Flujómetros

Para controlar el flujo de aire en el experimento se usaron dos flujómetros Aalborg GFC17, con capacidad para regular velocidades desde 10 ml/min a 10 l/min. Con una precisión de $\pm 1.0\%$ a escala completa [30].

2.1.5 Baño térmico

Para mantener la temperatura constante en el recipiente que contendrá el sensor este se colocara en el baño térmico RTE 10, puede mantener una temperatura que se encuentre en el rango de -25°C a 150°C con una estabilidad de temperatura de $\pm 0.01^\circ\text{C}$ [31].

2.1.6 Fuente de poder

Las fuentes de poder usadas en el experimento se construyeron en el Laboratorio tienen un rango de voltaje de 0 V a 30 V, puede pasar corrientes hasta una magnitud de 3 A.

2.2. Lenguaje ensamblador

Se dice que este tipo de lenguajes es de bajo nivel porque sus instrucciones ejercen un control directo sobre el hardware y están condicionados por la estructura física de las computadoras que lo soportan, tienen un control directo sobre el hardware y está condicionado por la estructura del dispositivo que lo soporta. El uso de la palabra bajo indica que tiene una reducida abstracción entre el lenguaje y el hardware.

El computador digital solo acepta indicaciones en código binario y el lenguaje ensamblador facilita la escritura al programador al expresarlas en formas de nemónicos, es decir, tres o cuatro letras que se usan como una referencia en ingles a la operación que se realiza con la instrucción.

Los lenguajes de alto nivel contienen instrucciones más potentes y complicadas pero se debe tomar en cuenta que cada una de estas instrucciones está formada por otras más elementales en un pequeño programa. La ventaja de usar el lenguaje ensamblador directamente se encuentra en que se pueden usar estas instrucciones elementales en menos líneas de código al remover las que no son necesarias dependiendo a las necesidades de la tarea a realizar. Esto a diferencia de las instrucciones sofisticadas de un lenguaje de alto nivel cuyo número de líneas de código no se puede modificar.

2.3. Creación de la interfaz por medio de LabView

El programa LabView es un programa para diseñar interfaces, a diferencia de otros lenguajes de programación este es uno visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas además de control y diseño.

2.4. Ajustes de regresión con Minitab

Minitab es un paquete de estadística diseñado para ejecutar diversos análisis estadísticos. Los datos se manejan por medio de hojas de cálculo, por lo que es sencillo de usar al pasar datos desde otro programa. La herramienta por la que este programa fue usado es la regresión no lineal.

El proceso necesario para que Minitab pueda realizar los ajustes es simple. Primero se debe tener una columna de predictor real, lo que vendría siendo el eje x y una columna de datos de respuesta que les correspondería el eje y. Se escribe o se selecciona desde un catálogo la función a la que se desea hacer el ajuste. Elegimos los valores iniciales y el algoritmo que creamos conveniente, en el caso de las regresiones aplicadas a las respuestas del sensor se usó el método de Gauss-Newton. También se pueden elegir cuales de las gráficas y los coeficientes resultantes de los cálculos aparecerán al final del procedimiento.

2.5. Concentración de un gas

La concentración es la medida sobre cuanta cantidad de sustancia dada se encuentra en una mezcla de dos o más sustancias. En este trabajo la variable física que se puede detectar es la concentración del vapor de etanol diluido en el aire. Debido a que los compuestos se conservan en viales, frascos pequeños, se experimenta un cambio del estado líquido al gaseoso. Para obtener la concentración dentro del sistema dinámico es necesario conocer la relación entre esta y la velocidad de los fluidos mostrada en la Ec. 15.

$$C = \frac{kD_r \times 10^3}{F} \quad \text{Ec. 15}$$

donde C es la concentración expresada en partes por millón (ppm), F es el flujo de aire en ml/min, D_r es la velocidad de evaporación de la muestra a medir en $\mu\text{g}/\text{min}$ y está dada en la Ec. 16.

$$D_r = \frac{m \times 10^6}{t} \quad \text{Ec. 16}$$

siendo m el cambio de la masa de la muestra en gramos y t el tiempo en minutos, finalmente k es un factor de conversión el cual se calcula con la Ec. 17.

$$k = \left(\frac{22.4}{M}\right) \left(\frac{273 + T}{273}\right) \left(\frac{p}{760}\right) \quad \text{Ec. 17}$$

donde M es el peso molecular de la muestra en gr/mol, T es la temperatura del vapor diluido en grados kelvin y p es la presión del sistema en mmHg.

Para calcular la concentración en un sistema estático se utiliza la Ec. 18.

$$C = \frac{22.4\rho T_s V_l \times 10^3}{273PMV_g} \quad \text{Ec. 18}$$

donde C es la concentración en ppm, ρ es la densidad de la muestra líquida en gr/ml, T_s es la temperatura de la cámara en Kelvin, V_l es el volumen de la muestra líquida en μl , PM es el peso molecular de la muestra y V_g es el volumen de la cámara en litros.

2.6 Ensamble del sistema

La detección de gas del sistema comienza en el sensor. Al haber una mayor concentración de gas el sensor tendrá una disminución en su resistencia al paso de corriente eléctrica y viceversa. El voltaje de salida se digitaliza con el conversor analógico digital del microcontrolador, este analiza la información y el PIC enviara esta información procesada a través del protocolo serial hacia la PC

La Figura 8 muestra el circuito básico del sensor, puede notarse que se trata de un divisor de voltaje. Este circuito requiere dos entradas de voltaje: El voltaje V_H es aplicado en los pines 1 y 4 al calefactor integrado para mantener el elemento de detección a una temperatura específica que es óptima, la polaridad puede ser intercambiable. El voltaje del circuito (V_C) es aplicado para permitir un voltaje de medida (V_{RL}) a través de una resistencia de carga (R_L) que se conecta en serie con la resistencia del sensor (R_S), de acuerdo con la Ec. 19 podemos ver que en el caso de que la resistencia del sensor aumente el voltaje de medida disminuirá y viceversa.

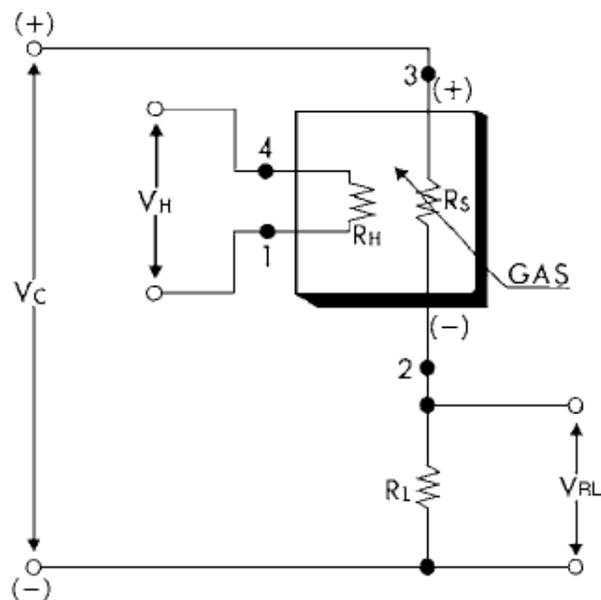


Figura 8. Conexiones del sensor dentro del circuito, la señal enviada al PIC16F877A es enviada por el voltaje V_{RL} [24].

Una fuente de poder común puede ser usada para ambos voltajes de entrada V_C y V_H para cumplir con los requerimientos eléctricos. Puede notarse que es necesario mantener la polaridad de V_C y tener cuidado en la conexión de pines del sensor como se muestra en la Figura 8. El valor de la resistencia de carga (R_L) debe ser elegido para optimizar el valor de umbral de alarma, manteniendo la potencia de consumo (P_S) por debajo de un límite de 15 mW. La potencia de consumo es la más alta cuando el valor de R_S sea igual al de R_L en la exposición al gas. Para el caso

de este trabajo una resistencia de 10 K Ω fue usada ya que tiene un valor suficientemente alto para evitar el umbral. Se puede calcular el voltaje de medida V_{RL} por medio de la fórmula del divisor de voltaje:

$$V_{RL} = \frac{R_L}{R_L + R_S} V_C \quad \text{Ec. 19}$$

Si despejamos la Ec. 19 podemos obtener el valor de la resistencia del sensor por medio de la Ec. 20 se utiliza para determinar R_S , la resistencia del sensor.

$$R_S = \frac{V_C - V_{RL}}{V_{RL}} R_L \quad \text{Ec. 20}$$

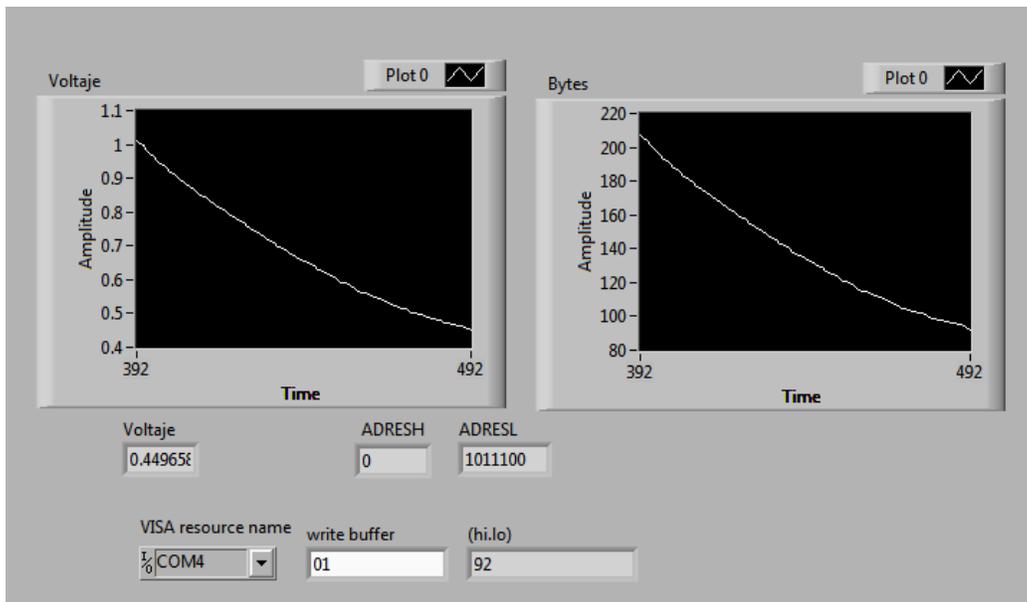


Figura 9. Captura de pantalla del programa realizado en LabVIEW en ejecución.

El convertor analógico digital usa un voltaje de referencia V_{ref} del cual depende la resolución a la que el PIC puede convertir las señales analógicas. Debido a que este es capaz de usar diez bits para este propósito tenemos una resolución de 1024 divisiones, por lo cual el algoritmo puede complicarse porque el microcontrolador está solamente capacitado para manejar cadenas de ocho bits y almacenar información del mismo tamaño, por esta misma razón se deben hacer los ajustes pertinentes al programa para que pueda operar la memoria del convertor de 10 bits. Estas señales llegan al periférico MAX 232 para su posterior conversión.

En este trabajo se usó la herramienta de desarrollo LabVIEW para realizar la interfaz que el usuario necesita para observar la situación de las mediciones en tiempo real y para almacenar los datos de la respuesta del sensor en un archivo. En la Figura 9 pueden notarse dos graficas mostrando la misma respuesta pero devolviendo valores en magnitudes diferentes, en voltaje y el valor ocupado por los bytes pero en el sistema decimal para una mejor interpretación. El tiempo expresado en las gráficas está en razón de muestreo, debido a que estas se actualizan cada vez que un nuevo dato llega a la computadora por lo que la representación del progreso de las mediciones es más fácil de interpretar. Durante este proyecto se utilizaron razones de muestreo a una velocidad de 3 y 5 muestras por segundo ya que era la velocidad a que la computadora podía trabajar los momentos de las mediciones. Debajo de las gráficas hay un cuadro con el valor del voltaje en el instante que se tomó la captura de pantalla además del valor de los bytes del conversor analógico digital. En la parte inferior está el nombre del puerto en el que se está efectuando el intercambio de datos, en la parte de en medio se muestra el número que se encuentra en el buffer y que la computadora transmite como una señal para indicar que está lista para recibir una nueva cifra del ADC. A la derecha se encuentra el valor de los bytes del conversor escrito en sistema decimal.

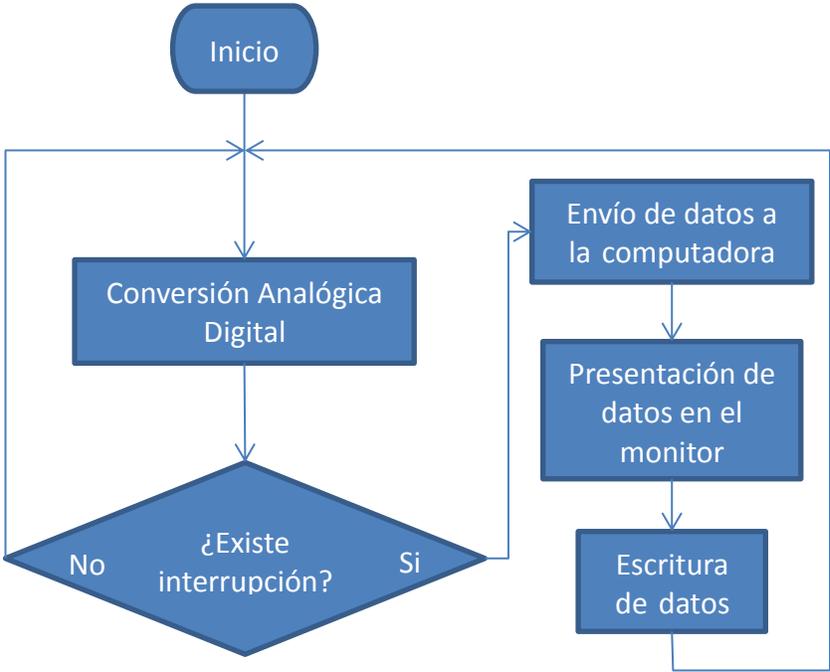


Figura 10. Diagrama de flujo del sistema usado para la medición de la respuesta del sensor.

El diagrama de flujo se muestra en la Figura 10. Puede observarse que, el conversor analógico puede funcionar independientemente de la computadora. Cuando el sensor reacciona a la concentración del gas su resistencia cambia, por lo que los valores de voltaje también lo hacen. El conversor analógico digital recibe el valor del voltaje y por el condensador de retención incluido en el microcontrolador comienza la conversión que debe llevarse a cabo en un tiempo de adquisición, después la conversión se realiza en dos o tres microsegundos. Si en alguno de estos ciclos de conversión la computadora manda una señal al microcontrolador este interrumpirá lo que se encuentre haciendo y comenzará con otra rutina que consiste en el envío de los bytes que contienen los resultados de la conversión. Una vez recibidos por la computadora esta presentará la medición nueva colocándola en el espacio que le corresponde en la gráfica además de escribir el valor del voltaje en un archivo.

2.6.1. El sistema estático

En el sistema estático se muestra en la Figura 11. En el colocamos el sensor de estado sólido dentro de una cámara de teflón que se encuentra en un baño térmico, para evitar que los cambios de temperatura modifiquen la respuesta del sensor. El sensor se conecta al circuito que convertirá las señales para que la computadora pueda recibirlas y guardarlas.

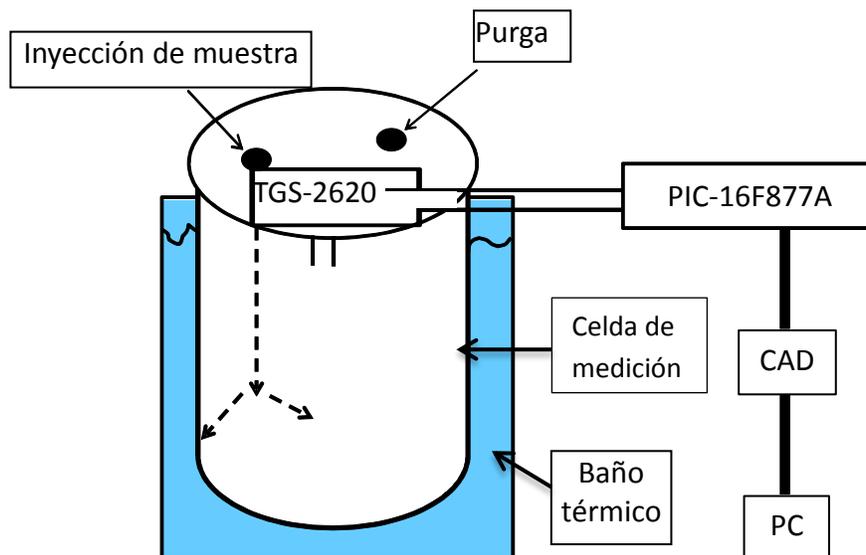


Figura 11. Esquema del sistema estático.

El procedimiento para hacer las mediciones en el sistema estático consiste en inyectar etanol a la cámara en intervalos de tiempo regulares para medir la respuesta del sensor en su estado estable. En el caso de este proyecto se encontró que 10 minutos eran necesarios para llegar al estado estable de cualquiera de las concentraciones tratadas. Una serie de mediciones ha consistido en inyectar 0.5 μl en cada intervalo hasta llegar a 5 μl y la otra serie consistió en inyecciones de 1 μl hasta llegar a 5 μl para después inyectar 5 μl para obtener 10 μl y continuar inyectando 10 μl por intervalo hasta llegar a 40 μl .

2.6.2. El sistema dinámico

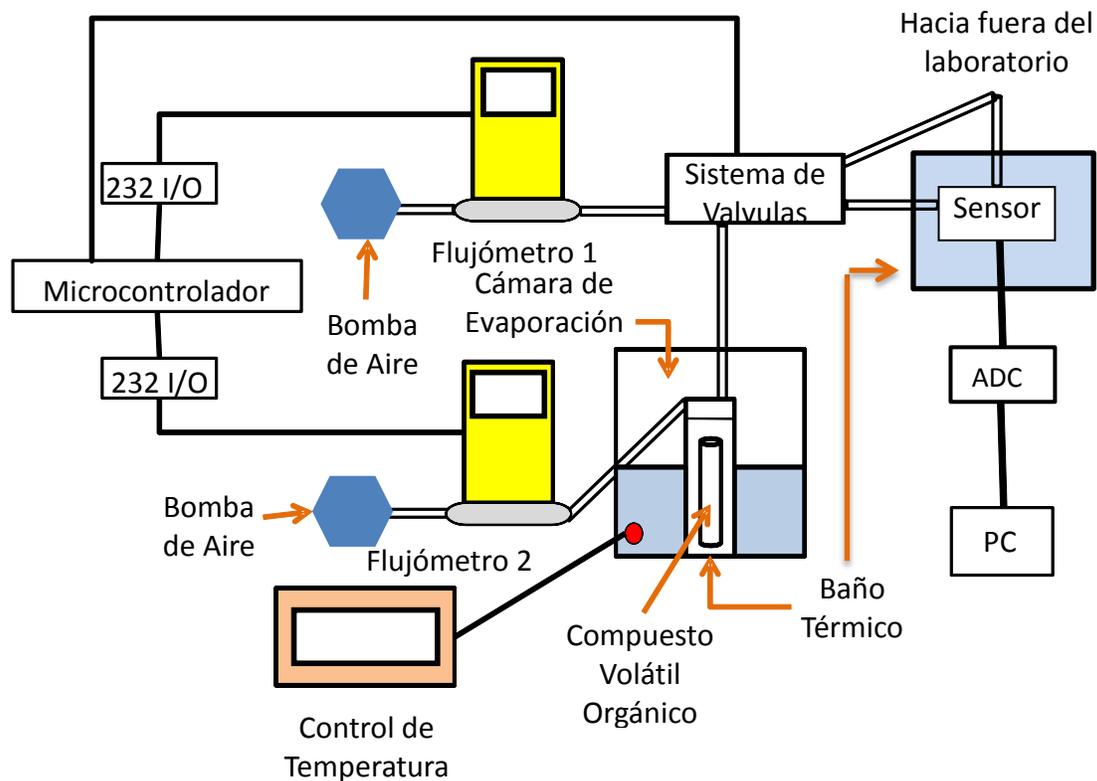


Figura 12. Diagrama del sistema dinámico.

Se pueden observar los componentes del sistema dinámico en la Figura 12 está formado por un baño térmico, dos bombas de aire unidas con sendos flujómetros unidos a su vez a un sistema de válvulas para llevar el gas al sensor. Un microcontrolador ejecuta las órdenes recibidas por el usuario. Las instrucciones son dadas a partir de un teclado. Las acciones que se pueden cambiar

son la modificación de la velocidad del flujo que pasa por las mangueras o modificar el paso del gas que se requiere que llegue al sensor.

Antes de realizar las mediciones de las respuestas dinámicas del sensor TGS-2620 ante la exposición de etanol, se debe caracterizar la velocidad con la que el gas se evapora de un vial cuando este se encuentra en ciertas condiciones controladas de temperatura para averiguar su comportamiento, esto se realiza mediante la técnica de peso perdido la cual consiste en medir el peso del contenido del vial en intervalos de tiempo regulares, en este caso se realizó en lapsos de una hora, tras cada medición se observa una disminución en la masa que está contenida en el vial.

Para este paso solo se necesita conservar una temperatura fija en la cámara que contiene el vial así como mantener un flujo de aire que pase a través de este recipiente con el fin de purgar el vapor de este. Es importante mencionar que el flujo de aire no afecta a la velocidad de evaporación como ha sido reportado en un trabajo anterior [9].

Para observar las diferentes respuestas del sensor a diferentes concentraciones se determina primero la temperatura a la que se desea que el gas se evapore y después se elige el flujo que transitará por las mangueras de acuerdo con la Ec. 15 se puede notar que al aumentar la velocidad de evaporación aumenta la concentración sucediendo lo opuesto si tomamos la velocidad del flujo.

Capítulo 3

3. Resultados

3.1. Sistema estático

En primer lugar se analizan las respuestas del sensor en el sistema estático para comprobar su funcionamiento. Se puede notar en la Figura 13 que los lapsos dados para la estabilización de la respuesta del sensor no son suficientes para discernir escalones.

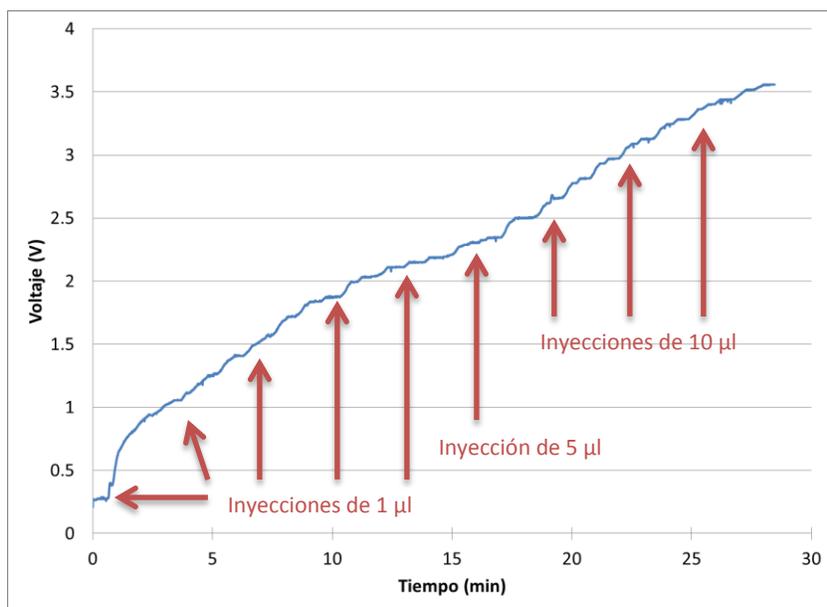


Figura 13. Medición en el sistema estático, con intervalos de tiempo de tres minutos entre inyecciones.

Por medio de varias pruebas se logró distinguir que se obtienen gráficas claras cuando se hacen inyecciones en intervalos de 10 minutos (Figura 14), ya que se le da al sensor un tiempo adecuado para alcanzar una respuesta constante así como darle la posibilidad al compuesto volátil de evaporarse totalmente, se puede notar que el tiempo de estabilización y la diferencia de voltaje entre escalones toman valores más grandes en las concentraciones bajas y que el tiempo de evaporación del etanol inyectado es más prolongado al aumentar el volumen de la muestra. Gradualmente al aumentar la concentración se alcanza un voltaje de saturación que se manifiesta como una diferencia de voltaje menor entre escalones. Al obtener una gráfica cuyos escalones

tienen una respuesta estable en cuanto al voltaje, podemos promediar las respuestas para asignarlo a cada concentración calculada correspondiente. Al calcular el promedio de los escalones en la región constante se obtiene la gráfica de la Figura 15 Se observa que el comportamiento del sensor a diferentes concentraciones es exponencial, de acuerdo a las especificaciones dadas por el fabricante.

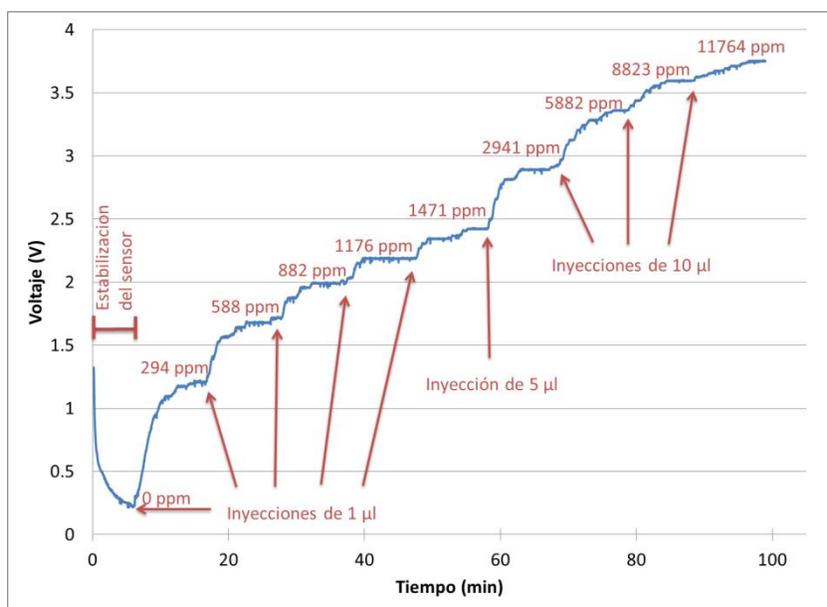


Figura 14. Mediciones en el sistema estático.

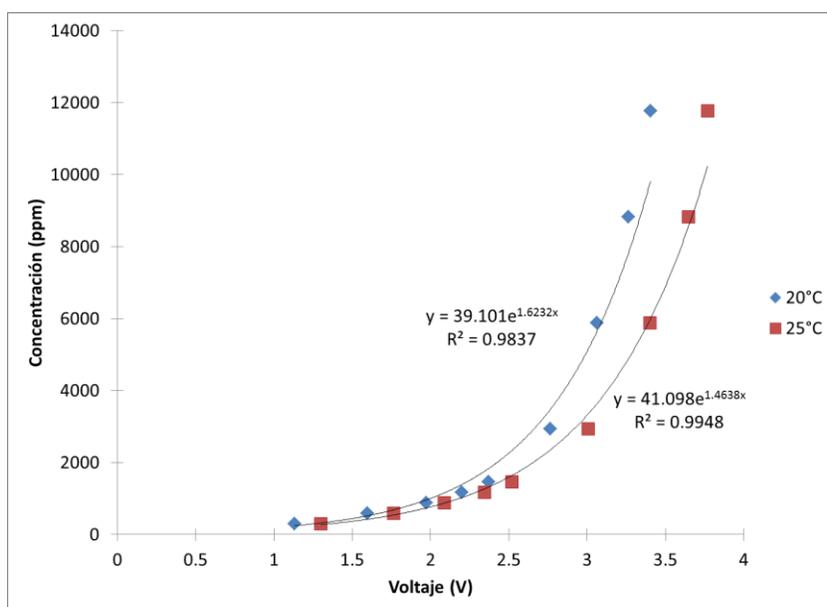


Figura 15. Razón entre el voltaje y la concentración.

Si calculamos la razón de cambio de la resistencia del sensor con la resistencia de carga podemos obtener la gráfica que está expuesta en la Figura 16 si la comparamos con la versión de los valores del fabricante en la Figura 17 podemos ver la similitud de las respuestas, sabiendo esto podemos estar seguros de que el sensor funciona de manera adecuada y que nuestras mediciones serán confiables.

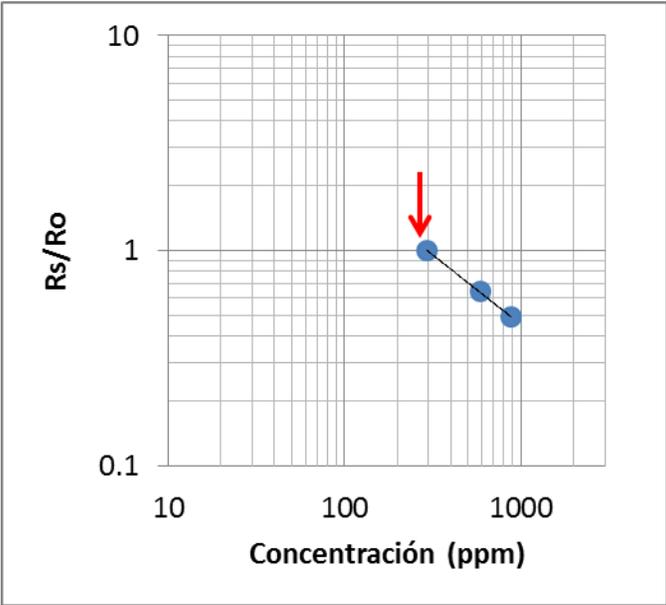


Figura 16. Razón de la resistencia del sensor entre la medición obtenida a 20° C.

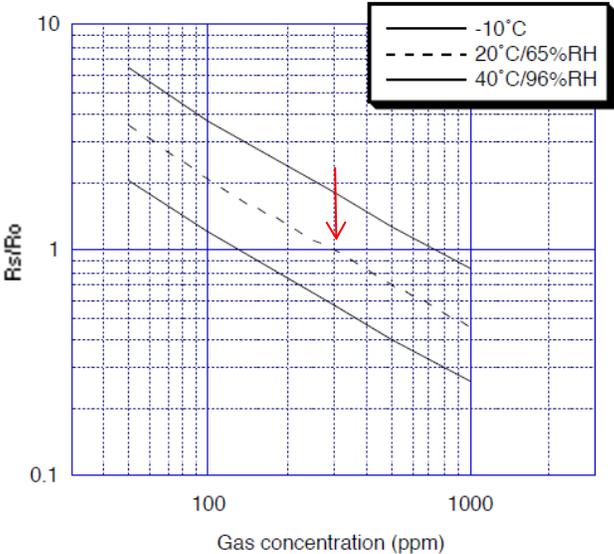


Figura 17. Razón de cambio de la resistencia del sensor [24].

3.2. Velocidad de evaporación

Se hicieron mediciones para caracterizar la velocidad de evaporación en el sistema estático. Durante esta sección del trabajo se usaron 2 viales. El primero mide 6.82 mm de altura, 1.68 mm de diámetro externo y 0.96 mm en el diámetro interior del cuello (vial 1), el segundo 7.21 mm de altura, 1.87 mm de diámetro externo 0.95 mm (vial 2). Conocer la velocidad de evaporación nos llevará a conocer la concentración del sistema dinámico de acuerdo con la Ec. 15. La Figura 18 muestra los primeros resultados obtenidos a partir del método de pérdida de masa en el vial 1. Por la razón de que los valores de los coeficientes de correlación son mayores que 0.95 puede decirse que los puntos tienen un comportamiento al de una recta, pero no tienen los valores de velocidades de evaporación obtenidos en un trabajo anterior [9], por eso se continuó haciendo mediciones tratando de controlar cualquier factor que influenciara los resultados.

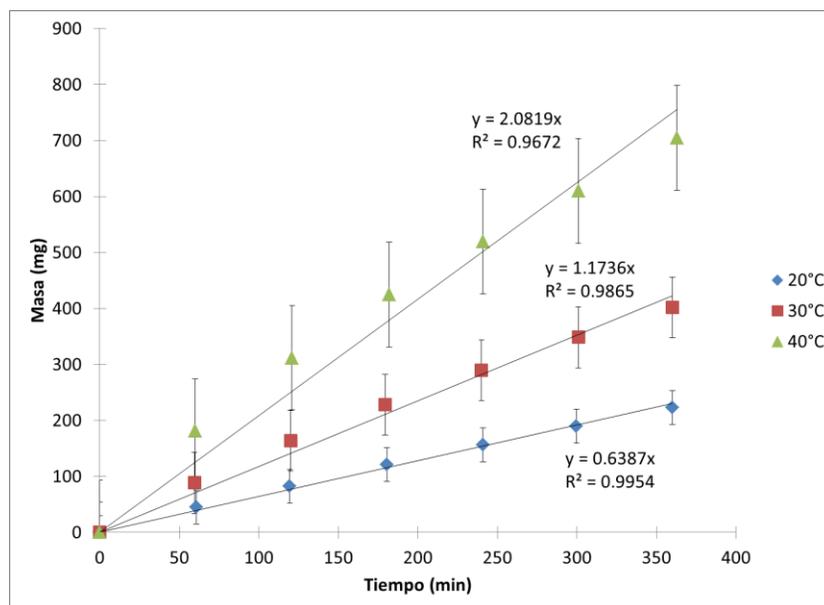


Figura 18. Grafica de la velocidad de evaporación hecha a partir del vial 1 en comparación a los usados en una referencia anterior.

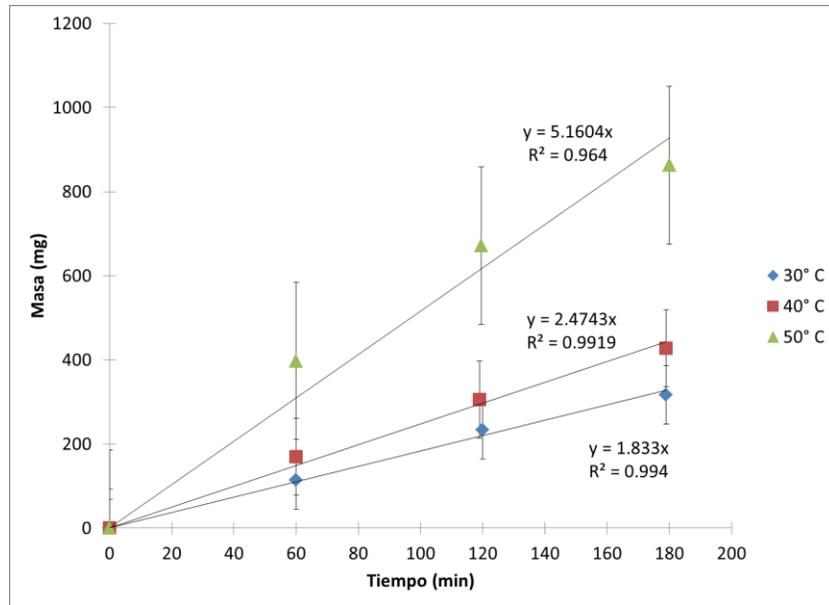


Figura 19. Datos obtenidos a partir del vial 2 del que se tienen referencias sobre el comportamiento de la velocidad de evaporación del etanol contenido en él.

Podemos notar de la Figura 19 que los puntos obtenidos se encuentran dentro del ajuste de una recta. Aun así los datos de la velocidad de evaporación no son similares a los obtenidos anteriormente [9] a pesar de usar el mismo vial, el número 2. Más tarde se encontró una corriente de aire en el laboratorio que dificultaba el control de temperatura del sistema, por lo que las próximas mediciones se realizaron evitando este problema. También se cambió la altura de la superficie del etanol en el vial, del cuello de este a una parte más baja, evitando con esto que el etanol mojara la tapa en el momento de manipularlo para medir su masa en una báscula. Con estos cuidados se obtuvieron las mediciones expuestas en la Figura 20. Puede observarse que los puntos están dentro del comportamiento de las rectas del ajuste y además los valores son similares a los obtenidos anteriormente [9]. Es importante notar que las futuras mediciones pueden hacerse dentro de un rango de 3 horas ya que el comportamiento fue comprobado en ese lapso. Al demostrar el modelo del sistema como uno lineal se puede decir que la evaporación es constante por lo que no debemos ajustarlo a alguna función más compleja de tratar y podemos continuar usando la Ec. 15 sin algún cambio.

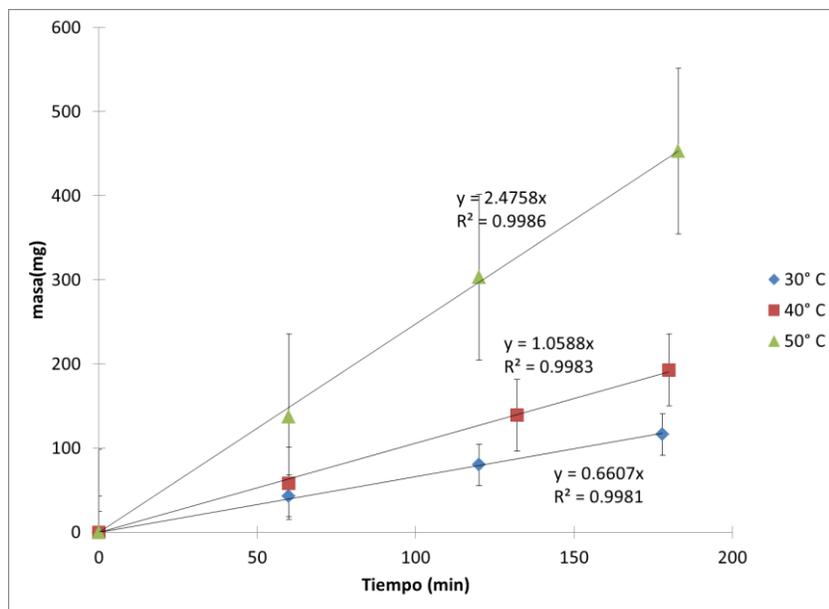


Figura 20. Gráfica obtenida gracias a un control de temperatura adecuado y a la mejoría sobre la manipulación del vial.

Otro punto importante que podemos notar de las gráficas de esta sección es que la velocidad de evaporación de la obtenida en las primeras dos ocasiones son más rápidas que en la última, probablemente sea debido a que el sistema estaba siendo obligado a usar más energía para calentarse y a que parte del etanol se quedaba en la tapa de los viales al momento de medir la masa contenida.

3.3. Sistema dinámico

Con el fin de estudiar la respuesta transitoria se realizaron mediciones de respuesta en el sistema dinámico. A los escalones de las primeras mediciones del sensor se les dio un tiempo de cinco minutos tanto para la respuesta por el estímulo del gas como la de recuperación. En la Figura 21 a) se puede ver que para cada concentración calculada tenemos los siguientes flujos: 3653 ppm (100 ml/min), 1826 ppm (200 ml/min), 1218 ppm (300 ml/min), 913 ppm (400 ml/min), 731 ppm (ml/min) en la temperatura de evaporación de 20° C. Los escalones obtenidos de la respuesta en la subida tienen valores similares en el estado estable para el mismo flujo por lo que se aprecia reproducibilidad. El comportamiento del sensor concuerda con la Ec. 15 ya que cuanto mayor es el flujo la concentración disminuye por lo que la respuesta debe ser menor. Para las mediciones hechas para evaporaciones en 30° C y 40° C también tenemos respuestas diferentes dependiendo de la concentración pero con valores en el estado estable diferentes. En la Figura 21 b) se muestra el acercamiento a la primera curva de aumento de voltaje, para la concentración más grande se

puede ver una curva que tarda más tiempo en llegar al estado estable, mientras que para el resto hay un comportamiento similar.

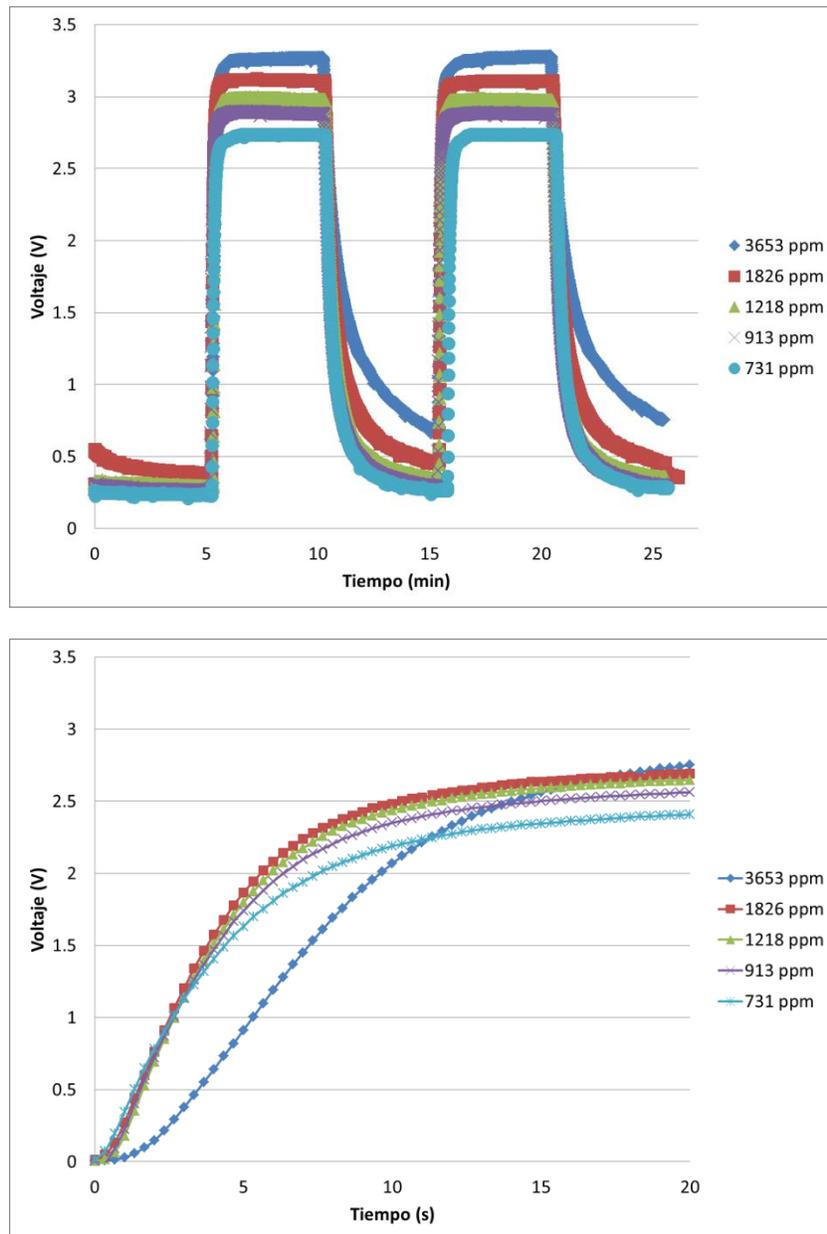


Figura 21. a) Respuesta en escalones para una temperatura de 20° C.
 b) Acercamiento sobre los primeros puntos de la respuesta transitoria.

En la Figura 22 Se muestra la gráfica del escalón de estímulo ascendente para una velocidad de 200 ml/min. Una característica importante que puede verse es que para dos de las diferentes temperaturas de evaporación medidas tenemos un voltaje muy parecido lo que se traduce en concentraciones medidas de valor similar que contradice lo expresado en los resultados obtenidos en la velocidad de evaporación y en la Ec. 15 ya que a una mayor temperatura la velocidad de

evaporación aumenta y con ella la concentración. Puesto que los valores de los escalones no siguen el comportamiento adecuado estas mediciones fueron descartadas.

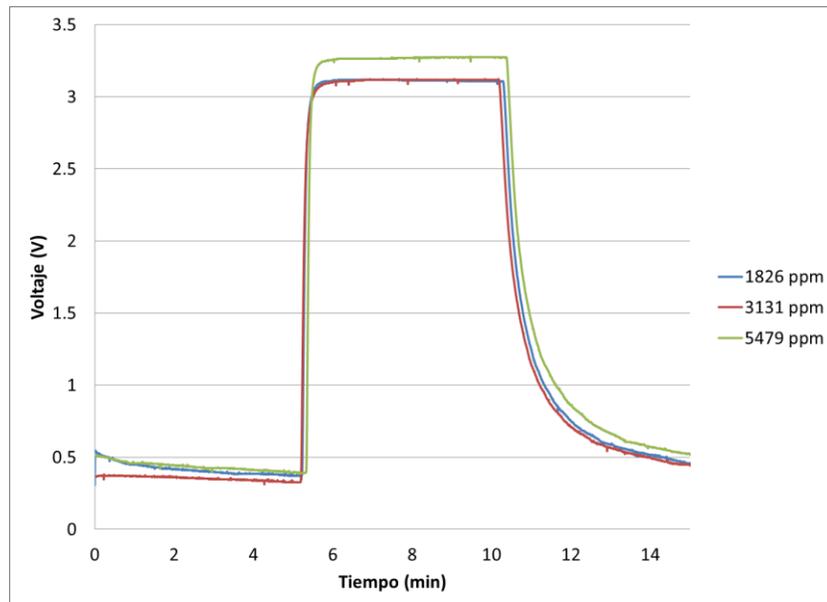


Figura 22. Gráfica de las mediciones para un flujo de 200 ml/min, las temperaturas por concentración calculada son: 1826 ppm (20° C), 3131 ppm (30° C), 5479 ppm (40° C).

Tras haber asegurado el comportamiento constante en velocidad de evaporación se continuó con las mediciones de escalones, esta vez se descartó la temperatura de evaporación 20° C y se admitió la de 50° C. La comparación entre los estados estables para diferentes temperaturas se encuentra en la Figura 23 como puede notarse de esta el estado estable de 40° C tiene valores similares a las medición de 50°, esto sucede en el resto de las comparaciones excepto en la velocidad de 300 ml/min, se pudo determinar que el corrimiento fue causado por el cambio de las condiciones climáticas, ya que el día en el que se realizó la medición de 40° C fue lluvioso, de aquí se observó que la humedad afecta la respuesta del sensor.

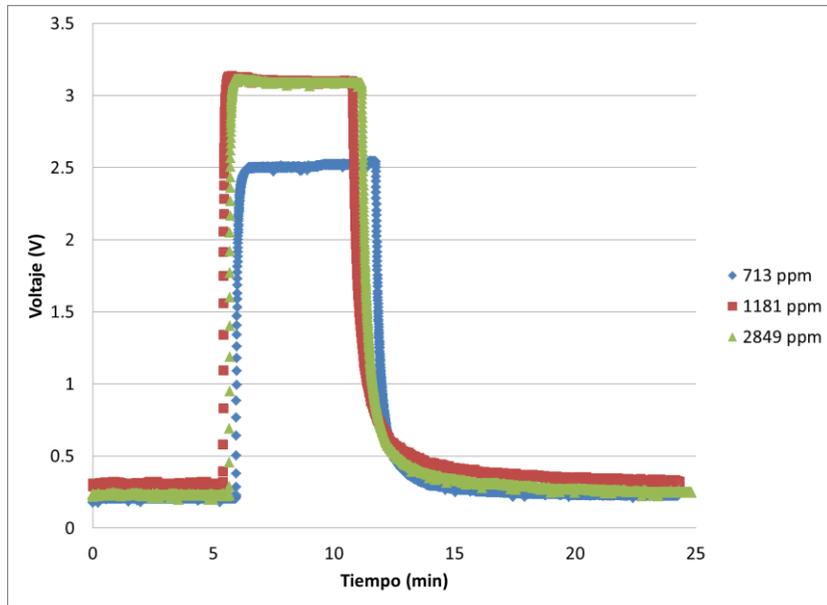


Figura 23. Grafica de respuesta del sensor a 30° C (713 ppm), 40° C (1181 ppm) y a 50° C (2849) en una velocidad de 500 ml/min.

Las condiciones de la humedad se mantuvieron, así que se realizaron otras mediciones de 40° C en otro día y se compararon con las anteriores como se puede ver en la Figura 24 solamente en la primera medición se tuvieron lluvias la mayor parte del día mientras que en la segunda no se presentó ninguna aunque el día fue nublado, así que podemos decir que se alcanzó una saturación y las mediciones siguientes están hechas aproximadamente bajo las mismas condiciones de humedad.

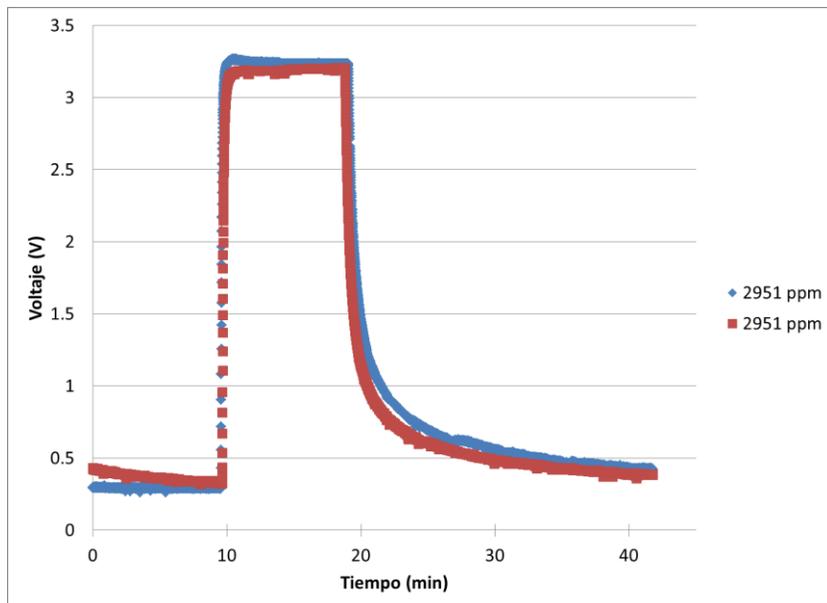


Figura 24. Grafica de respuestas del sensor a 40° C en una velocidad de 200 ml/min. Las mediciones fueron efectuadas en diferentes días, a la curva azul le corresponde la realizada a un día lluvioso a diferencia de la otra.

Se efectuaron mediciones de la respuesta del sensor a 30° C y a 50° C para complementar las mediciones hechas para la temperatura de 40° C. Como puede notarse en la Figura 25 hay valores diferentes en el estado estable para cada temperatura, lo mismo sucede para el resto de los flujos, hasta aquí podemos hablar de que los valores de las concentraciones parecen ser consistentes con las respuestas obtenidas.

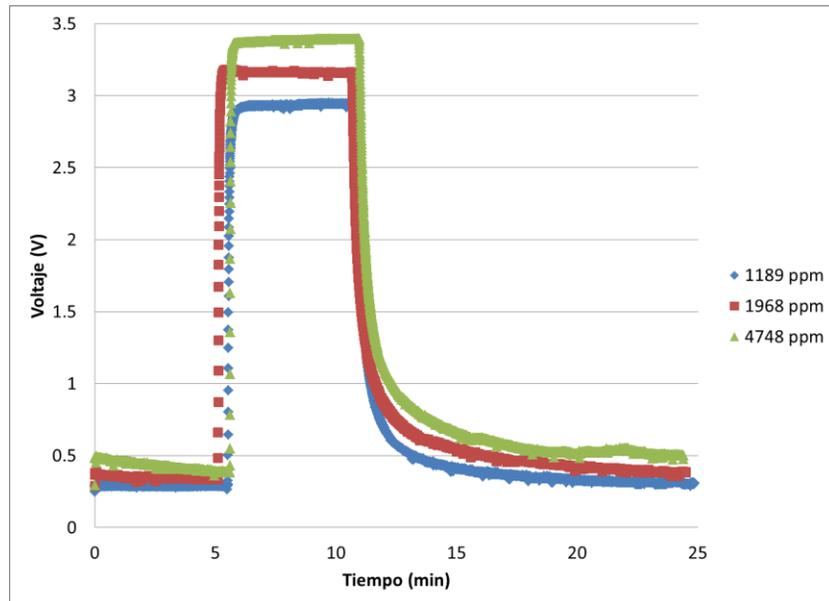


Figura 25. Gráfica de respuesta del sensor a 30° C (1189), 40° C (1968) y a 50° C (4748) en una velocidad de 300 ml/min.

Al hacer un acercamiento a los estados estables en la temperatura de evaporación a 50° C. En la Figura 26. Acercamiento al estado estable de la gráfica de respuestas del sensor a 50° C. notamos que estos tienen valores muy cercanos. Probablemente por una proximidad a la saturación, en esa gráfica pueden notarse unas pequeñas variaciones que se deben al límite de la resolución permitida por el PIC-16F877A. El estado estable de menor flujo es el que tiene una respuesta con menor concentración contradiciendo el comportamiento indicado por la Ec. 15. Otro aspecto importante es que la forma de las curvas obtenidas no es el mismo que el tratado en la Figura 3 y en la Ec. 6, esta norma aparece también en las temperaturas 40° C y a 50° C del tercer y cuarto conjunto de mediciones, por esta razón se cree que corresponden a otro modelo y se requiere estudiar un poco más.

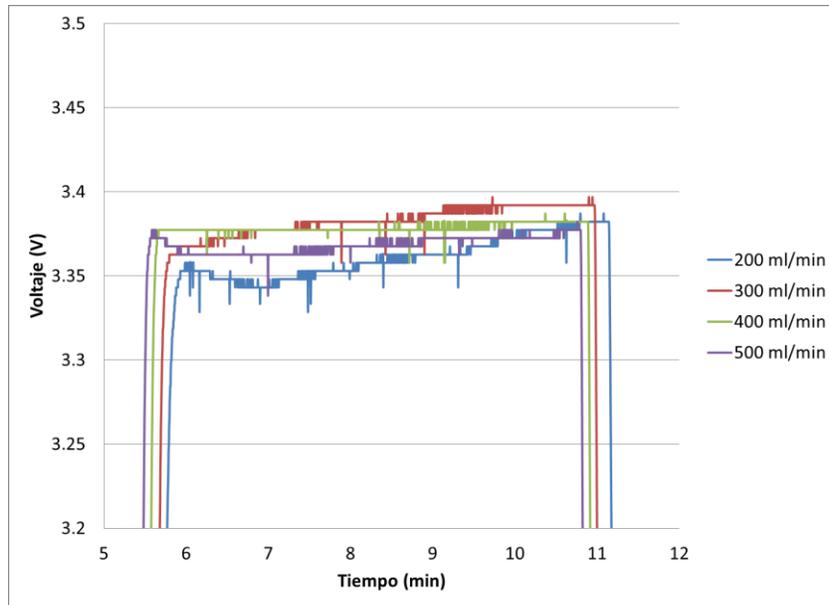


Figura 26. Acercamiento al estado estable de la gráfica de respuestas del sensor a 50° C.

Capítulo 4

4. Análisis

4.1. Análisis de respuesta transitoria

A partir de los datos obtenidos del sensor de estado sólido TGS2620 se realizó un análisis usando el software estadístico Minitab. Haciendo uso de las herramientas de regresión no lineal con el algoritmo Gauss-Newton se logró obtener el ajuste de las curvas de respuesta obtenidas. Tomando en cuenta la Ec. 7 el valor para R_1 debe ser el que obtenemos como voltaje de medición para la respuesta en el estado estable. Como la pendiente evaluada en el punto cero tiene un valor elevado (40-50) se espera que la constante de tiempo τ tenga valores menores que uno para que al multiplicarlas se obtenga el estado estable que tiene valores aproximados de 2 o 3 Volts.

4.2. Constante de tiempo

De la Figura 27 y la Figura 28 puede apreciarse que las constantes de tiempo para el flujo de 100 ml/min tienen valores muy alejados del resto de las velocidades de flujo. Por lo que se decidió no volver a hacer mediciones bajo esta condición ya que puede interpretarse como la respuesta del sistema [9] mientras que para el resto de los flujos podemos decir que las constantes de tiempo obtenidas son debidas al sensor. Esta diferencia en los valores de las constantes de tiempo podría relacionarse con el comportamiento descrito en la Figura 21 b).

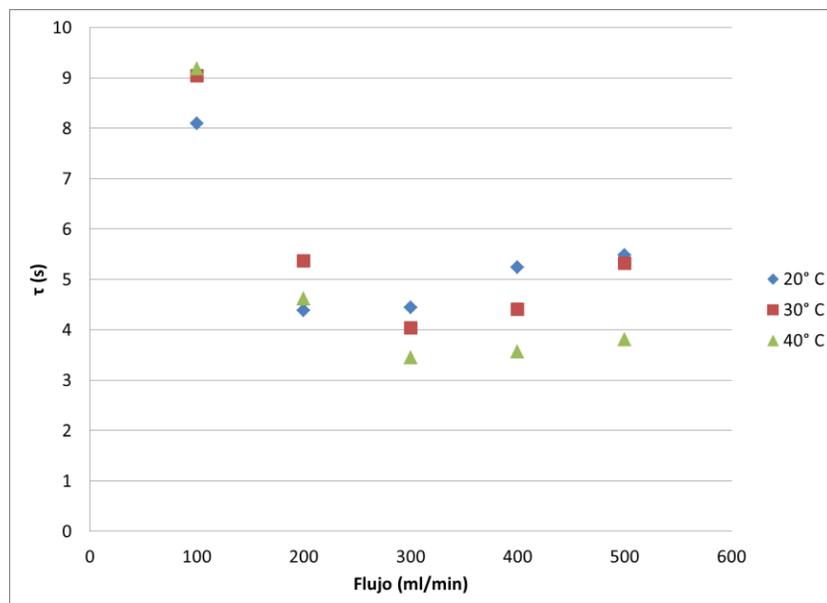


Figura 27. Constantes de tiempo para el primer escalón de subida de las primeras mediciones realizadas en el sistema estático.

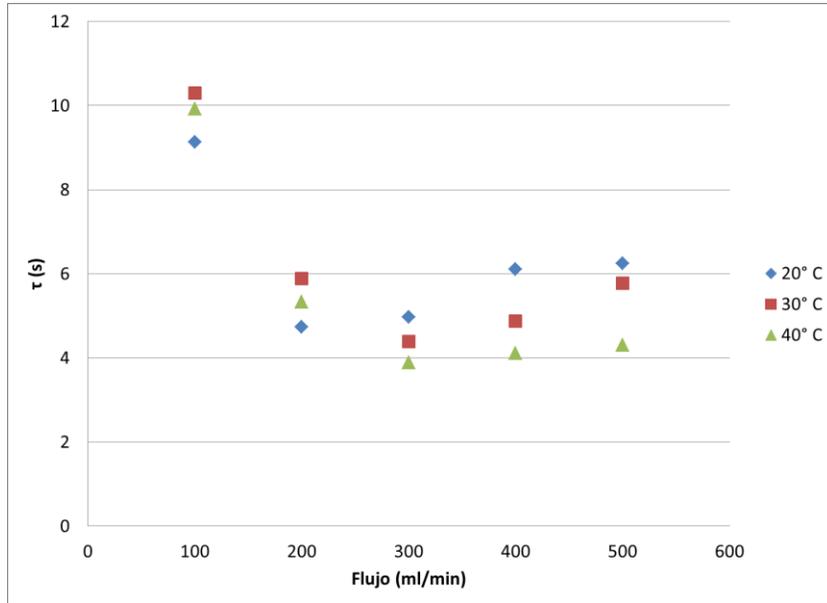


Figura 28. Constantes de tiempo para el segundo escalón de subida de las primeras mediciones realizadas en el sistema estático.

Debido a los valores similares en el promedio de 20 y 30 grados se graficaron los resultados de acuerdo al flujo como se muestra en la Figura 21 Se graficaron en total 5 curvas, el resto de ellas presenta una característica común: los valores de las primeras dos temperaturas, 20° y 30° C, son muy cercanas si las comparamos con la curva obtenida de los datos de la temperatura de 40° C. La Figura 29 muestra los valores de las constantes de tiempo:

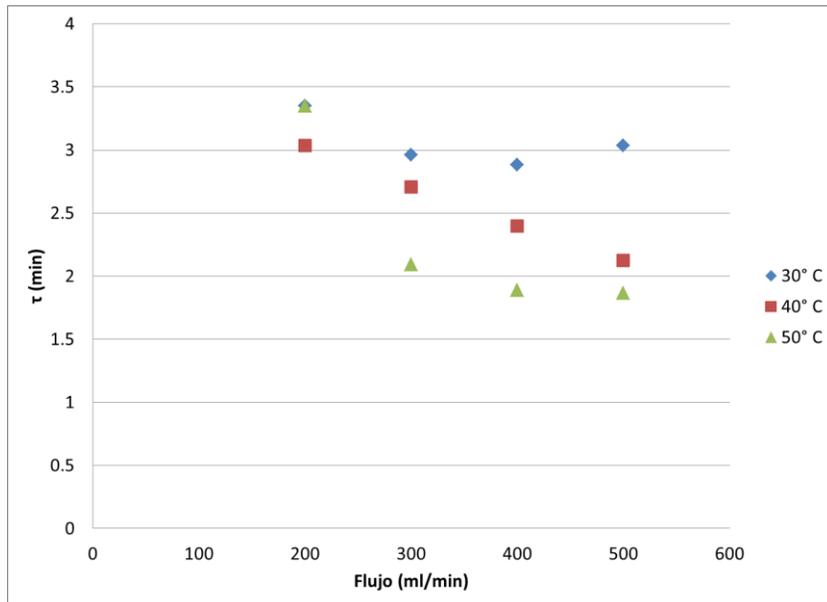


Figura 29. Valores de las constantes de tiempo. El primer punto de 30° C y el primero de 50° C tienen casi los mismos valores.

Podemos ver en la Figura 30 la medición de la humedad del día en que se realizaron las mediciones de la Figura 29, en el tiempo abarcado por los puntos circulares blancos no se realizaron mediciones mientras que los rombos de color azul corresponden a la medición en una temperatura de evaporación de 30° C y los marcadores triangulares verdes corresponden a las mediciones para la temperatura de evaporación de 50° C. De la Figura 29 podemos ver que tenemos datos anómalos como los dos últimos puntos de la serie de 30° C y el primero de la serie de 50° C. Si los comparamos con la gráfica de humedad podemos ver que estas anomalías sucedieron cuando se presentó una disminución en la humedad como la que se observa entre las 15:09 y las 16:09 horas.

Las mediciones que tienen un comportamiento adecuado se hicieron en humedades estables entre 50%-52% y 43%-45% de humedad, estos datos se obtuvieron por medio de un sensor de humedad comercial.

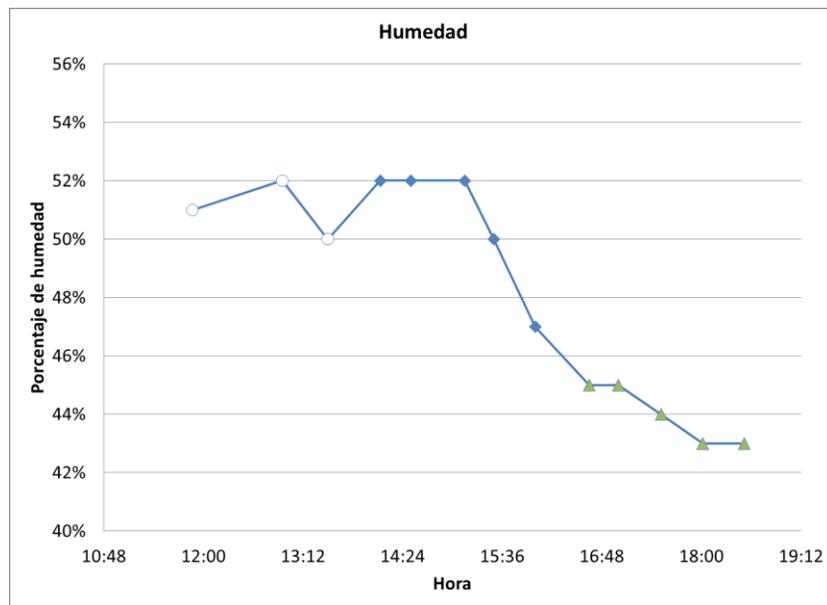


Figura 30. Valores de humedad del día 11/5/2015.

4.3. Coeficiente de ajuste

Podemos ver en la Figura 31, uno de los ajustes realizados por Minitab, la función calculada por este se encuentra trazada por una línea azul oscuro que casi no se distingue porque los puntos rojos obtenidos de las mediciones se superponen a esta. La pendiente que se tomó para comprobar las predicciones de la Ec. 9 es la que se denota como m representada como una línea azul claro que comienza en el primer punto registrado en la gráfica. De acuerdo con la Ec. 9

necesitamos saber los valores de la pendiente m evaluada en cero y la constante de tiempo τ para predecir R_1 , el valor de la respuesta en el estado estable.

Al observar las mediciones en los puntos cercanos al comienzo de la respuesta en escalón se notó que la respuesta del sensor no se comporta exactamente como en la Ec. 7, en la Figura 21 b) puede notarse que al principio el aumento del voltaje comienza lento, es decir con una pendiente pequeña, posiblemente esto se debió a la lejanía que tiene el sistema de válvulas con respecto al sensor o por un retraso en la conversión del PIC con respecto a los cambios de flujo. Se distinguió un patrón en las últimas mediciones que se aprovechó para obtener aproximaciones cercanas a lo descrito por la Ec. 7. Para que las curvas obtenidas a partir de las funciones obtenidas estuviesen lo más cerca posible de los puntos fue necesario descartar el primer punto obtenido de la respuesta transitoria.

Se realizaron varias pruebas sobre los puntos a elegir para elegir la pendiente que más se acercara al cálculo de la respuesta transitoria, el valor de R_1 . Uno de los métodos usados lo encontramos si volvemos a la conclusión obtenida de la Ec. 13, solo será necesario usar los primeros tres puntos de la respuesta transitoria obtenida. Otro método fue la realización de pruebas con ajustes de recta usando varios puntos cercanos al origen. El tercer método fue el cálculo de la pendiente usando solo dos puntos, siendo uno de ellos el primer punto de la respuesta transitoria. El método cuyo cálculo se acercó más a la respuesta en estado estable fue el último, usando al cuarto punto para calcular la pendiente, este patrón se cumplió en el resto de los casos, cualquier otra alternativa resultaba en un resultado menor al obtenido por este método, por lo tanto más alejado del resultado experimental.

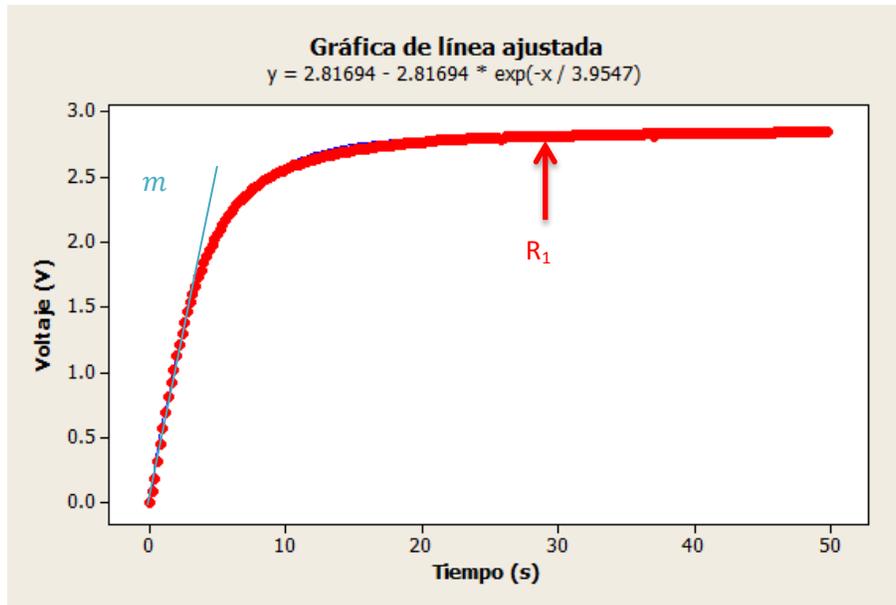


Figura 31. Ajuste para una velocidad de 200 ml/min a 30° C.

Al haber calculado los coeficientes de tiempo para las mediciones de 30° C de la tercera y cuarta ronda de mediciones. Se trató de obtener el valor del estado estable con las pendientes cercanas a cero con los puntos que se encuentran dentro del primer segundo de la respuesta transitoria. Los valores se encuentran en la Tabla 1 y la Tabla 2. Según la Ec. 9 se puede encontrar R1 si se multiplica τ , la constante de tiempo, y m la pendiente evaluada en cero. Si comparamos el estado estable calculado a partir del modelo con el medido veremos que son muy similares. En la Figura 32 se calcularon los coeficientes de ajuste para 30° C, se toma en cuenta el del clima húmedo por tener una pendiente más parecida a la línea azul que muestra lo que sería una equivalencia entre lo medido y lo calculado.

Tabla 1. Datos obtenidos para una temperatura de evaporación de 30° C en un estado del tiempo seco.

30° C seco				
Flujo ml/min	τ (s)	m	Cálculo de R1	Medición R1
200	3.95	39.59	2.61	2.81
300	3.13	45.45	2.37	2.45
400	3.20	43.99	2.35	2.38
500	3.45	41.06	2.36	2.25

Tabla 2. Datos obtenidos para una temperatura de evaporación de 30° C en un estado del tiempo húmedo.

30° C húmedo				
Flujo ml/min	τ (s)	m	Cálculo de R1	Medición R1
200	3.35	43.99	2.46	2.65
300	2.96	46.92	2.32	2.56
400	2.88	48.39	2.32	2.49
500	3.04	43.99	2.23	2.31

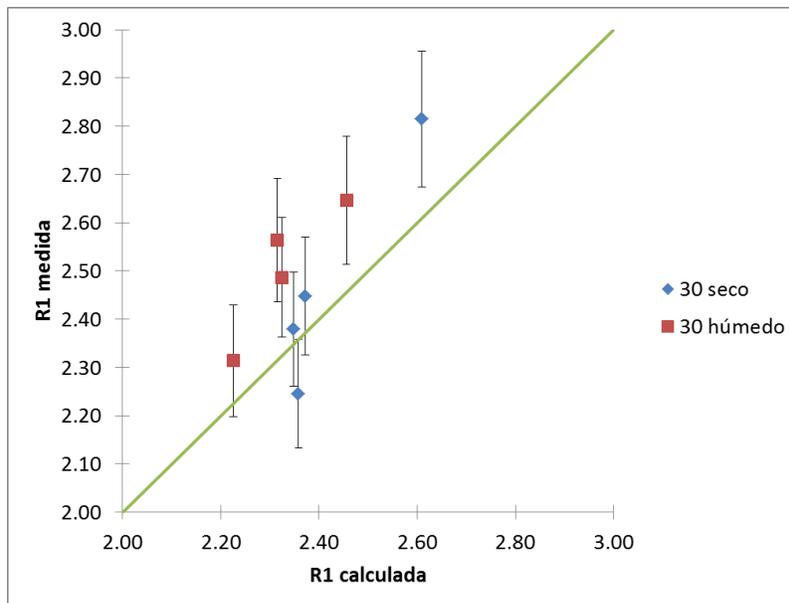
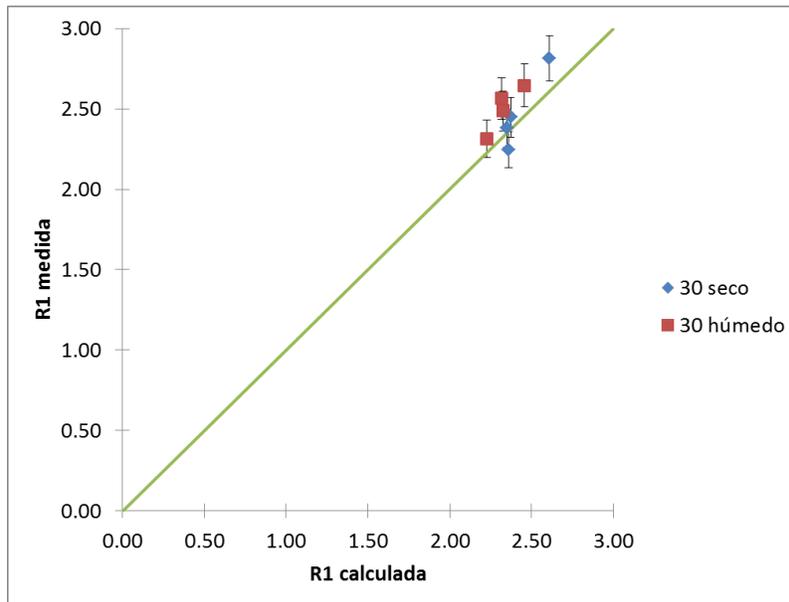


Figura 32. a) Ajustes de los valores obtenidos con los valores calculados.
b) Acercamiento a la comparación.

Como se observa en la Figura 32 a) y b) tenemos la comparación entre los valores obtenidos experimentalmente y los calculados para R1. La línea verde representa el lugar donde se esperaría que aparecieran los puntos si los valores calculados y los medidos fueran iguales. Se encontró que el error del 5% para el valor calculado alcanza los valores de esta línea para la mayoría de los puntos, lo que nos indica que podríamos realizar predicciones del estado estable a partir de la respuesta transitoria. Sin embargo, es necesario seguir estudiando este comportamiento.

Conclusiones

Se realizó un estudio de la respuesta transitoria del sensor de óxido metálico TGS-2620.

Se realizó un programa en el PIC-16F877A para que funcionara como un conversor analógico digital que utilizará la comunicación serial con la computadora.

Se realizó un programa en LabView para mostrar los datos en tiempo real y almacenarlos en un archivo para poder analizarlos posteriormente.

Se hicieron mediciones de la velocidad de evaporación por medio del método de la masa perdida y se encontró que esta tiene un comportamiento lineal, esto nos muestra que la velocidad de evaporación es constante, lo que garantiza una concentración constante por lo que es conveniente para las mediciones.

Se caracterizó la respuesta del sensor a varias concentraciones en el sistema estático. Gracias a estas se encontró que el sensor tiene una respuesta esperada con valores similares a los reportados por el fabricante.

Se realizaron mediciones sobre la respuesta dinámica del sensor TGS-2620. Encontrándose algunas de las condiciones que modificaban el resultado de los datos obtenidos, como las corrientes de aire y la humedad.

Se determinaron las constantes de tiempo para el modelo exponencial. Estas se usaron para realizar el cálculo del estado estable. El tiempo necesario para estimar la pendiente es de 1 segundo.

Se obtuvo la comparación entre el estado estable calculado a partir del modelo y el medido, los valores son muy similares, por lo que se puede decir que es posible predecir la respuesta en estado estable a partir de la respuesta transitoria, aunque esto es solo una aproximación. Se requiere realizar un estudio más profundo.

Trabajo a futuro

Realizar mediciones a menores y a mayores concentraciones de las realizadas.

Tomar mediciones a diferentes concentraciones de referencia.

Realizar mediciones con diferentes compuestos volátiles orgánicos para verificar el modelo del sistema de primer orden.

Analizar el modelo para una curva en escalón hacia abajo, es decir, removiendo el vapor del ambiente.

Buscar modelos que sean adecuados a las mediciones influenciadas por diferentes factores externos.

Crear una base de datos que permita al sistema reconocer patrones.

Implementar los conocimientos obtenidos en trabajos relacionados.

Es necesario tener una forma de controlar la humedad en futuros experimentos.

Bibliografía

- [1] M. Meredith, Neural circuit computation: complex patterns in the olfactory bulb, *Brain Research Bulletin*, nº 29, pp. 111-117, 1992.
- [2] R. Moncrieff, An Instrument for measuring and classifying odours, *Journal of Applied Physiology*, p. 742, 1961.
- [3] W. F. Wilkens y A. D. Hatman, An electronic analog for the olfactory processes, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964.
- [4] K. Persaud y G. H. Dodd, Analysis of discrimination mechanisms of the mammalian olfactory system using a model nose, *Nature*, 1982.
- [5] N. A. R. Workshop, Sensors and Sensory Systems for an Electronic nose, *NATO ASI Series E: Applied Sciences*, vol. 212, 1992.
- [6] S. Muñoz, T. Nakamoto y T. Moriizumi, Study of transient response of QCM odor/gas sensors coated with calixarene LB films, *Trans. IEE Jpn.*, Vols. %1 de %2119-E, nº 8/9, pp. 430-435, 1999.
- [7] R. Gutierrez-Osuna, H. T. Nagle y S. S. Schiffman, Transient response analysis of an electronic nose using multi-exponential models,» *Sensors and Actuators B Chemical*, nº 62, pp. 170-182, 1999.
- [8] J. Fonollosa, S. Sheik, R. Huerta y S. Marco, Reservoir computing compensates slow response of chemosensor arrays exposed to fast varying gas concentrations in continuous monitoring, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015.
- [9] D. L. Osorio Arrieta, Estudio de la respuesta transitoria de sensores de gas a base de resonadores de cuarzo, Puebla, 2013.
- [10] L. Yang, Z. Rongwei, D. Staiculescu, C. P. Wong y M. M. Tentzeris, A novel conformal RFID-enabled module utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes for gas-detection applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, nº 8, pp. 653-656, 2009.
- [11] F. Tian, S. X. Yang y K. Dong, Circuit and nose analysis of odorant gas sensors in an E-nose, *Sensors*, nº 5, pp. 95-96, 2005.
- [12] L. Fraiwan, K. Lwessy, A. Bani-Salma y N. Mani, A wireless home safety gas leakage detection system, *Proceedings of the 1st Middle East Conference on Biomedical Engineering*, pp. 11-14, 2011.
- [13] S. Johan, Z. Xuezhi, T. Unander, A. Koptuyug y H. Nilsson, Remote moisture sensing utilizing ordinary RFID tags, *Proceedings of 2007 IEEE Sensors*, pp. 308-311, 2007.

- [14] G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja y R. Binions, Metal Oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring, *Sensors*, nº 10, pp. 5469-5502, 2010.
- [15] H. Ning, A survey on Gas Sensing Technology, *Sensors*, pp. 9635-9665, 2012.
- [16] G. Korotcenkova y B. K. Cho, Instability of metal oxide-based conductometric gas sensors and approaches to stability improvement, *Sensors and Actuators B*, nº 156, pp. 527-538, 2011.
- [17] B. C. Munoz, G. Steinthal y S. Sunshine, Conductive polymercarbon black composites-based sensor arrays for use in an electronic nose, *Sensor Review*, nº 19, pp. 300-305, 1999.
- [18] L. Tong, G. Wu, J. Sheng, J. Zhang y L. Zhou, Oil-gas separation mechanism of polymer membranes applied to online transformer dissolved gases monitoring, *Proceedings of 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 97-100, 2004.
- [19] H. Miya, T. Shiina, T. Kato, K. Noguchi, T. Fukuchi, I. Asahi, S. Sugimoto, H. Ninomiya y Y. Shimamoto, Compact Raman Lidar for hydrogen gas leak detection, *Proceedings of 2009 Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim (CLEOPR)*, pp. 1-2, 2009.
- [20] K. H. Kim, Performance characterization of the GC/PFPD for H₂S, CH₃SCH, CH₃SCH₃ y CH₃SSCH₃, *Atmospheric Environment*, nº 39, pp. 2235-2242, 2005.
- [21] A. Niskanen, A. Varpula, M. Utriainen, G. Natarajan, D. C. Cameron, S. Novikov, V. Airaksinen, J. Sinkkonen y S. Franssila, Atomic layer deposition of tin dioxide sensing film in microhotplate gas sensors, *Sensors and Actuators B*, nº 227-232, p. 148, 2010.
- [22] T. N. Kwan, F. Boussaid y A. Bermak, A CMOS single-chip gas recognition circuit for metal oxide gas sensor arrays, *IEEE Transactions Circuits and Systems*, nº 58, pp. 1569-1580, 2011.
- [23] W. Zeng, T. Liu, Z. Wang, S. Tsukimoto, M. Saito y Y. Ikuhara, Selective detection of formaldehyde gas using a Cd-Doped TiO₂-SnO₂ sensor, *Sensors*, nº 9, pp. 9029-9038, 2009.
- [24] Figaro, TGS2620 Data Sheet.
<http://www.figarosensor.com/products/2620pdf.pdf>
- [25] A. J. Moshayedi y D. Gharpure, Implementing Breath to Improve Response of Gas Sensors for Leak Detection in Plume Tracker Robots, *Proceedings of the Third International Conference on Soft Computing for Problem Solving*, 2014.
- [26] J. M. Angulo Usategui y I. Angulo Martinez, Microcontroladores PIC Diseño practico de aplicaciones, Chile: McGraw-Hill Interamericana España, 2005.

- [27] J. M. Angulo Usategui y S. Romero Yesa, Microcontroladores PIC Diseño practico de aplicaciones. Segunda Parte, Chile: McGraw-Hill Interamericana España, 2005.
- [28] T. Instruments, MAX 232 Data Sheet.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>
- [29] Wavetek Meterman Operator's Manual Model 23XT,25XT,27XT,28XT Digital Multimeter, Everett, Washington, 2000.
<ftp://ftp.jameco.com/Archive/Current-TechDocuments/214324.pdf>
- [30] Operating Manual GFC Mass Flow Controller, 2014.
http://www.aalborg.com/images/file_to_download/A_GFC%20Manual%20TD9709M%20Rev%20P.pdf
- [31] Thermo Scientific NESLAB RTE Series Refrigerated Bath, Newington, 2007.
http://www.nist.gov/ncnr/upload/Circulating-Bath_Thermo-Scientific_NESLAB-RTE-7.pdf
- [32] Microchip, PIC16F87XA Data Sheet.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582C.pdf>