



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA DE LA RESPUESTA TRANSITORIA DEL SENSOR DE ESTADO SÓLIDO TGS- 2620 CON LA TEMPERATURA Y HUMEDAD

TESIS

PRESENTADA AL

POSGRADO EN FÍSICA

PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA APLICADA)

PRESENTA:

DAVID SILVA APANGO

ASESORES:

DR. SEVERINO MUÑOZ AGUIRRE

DR. JUAN CASTILLO MIXCÓATL

PUEBLA, PUE. JULIO DE 2017

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FISICO MATEMÁTICAS

**ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA DE LA RESPUESTA
TRANSITORIA DEL SENSOR DE ESTADO SÓLIDO TGS-
2620 CON LA TEMPERATURA Y HUMEDAD**

TESIS

PRESENTADA AL

POSGRADO EN FÍSICA

PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA APLICADA)

PRESENTA:

DAVID SILVA APANGO

ASESORES:

DR. SEVERINO MUÑOZ AGUIRRE

DR. JUAN CASTILLO MIXCÓATL

PUEBLA, PUE. JULIO DE 2017

Agradecimiento

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo al otorgarme la beca correspondiente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad, misma que me sirvió para solventar los gastos de investigación que fueron requeridos en el transcurso de esta maestría.

Índice general

1. Introducción	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Marco teórico	5
1.4.1. Nariz electrónica	5
1.4.2. Decaimientos exponenciales	5
1.4.3. Sistema de orden cero	5
1.4.4. Sistema de primer orden	6
1.4.5. Humedad Relativa	6
1.4.6. Sensores de gas	8
1.4.7. Tipos de sensores	9
1.4.8. Sensor TGS-2620	10
1.4.9. Respuestas de sensores	13
2. Desarrollo experimental	17
2.1. Descripción de materiales	17
2.1.1. Microcontroladores	17
2.1.2. El circuito integrado MAX232	21
2.1.3. Sensor analógico de humedad HIH-4030	22
2.1.4. Sensor analógico de temperatura LM-35	23
2.1.5. Módulo de temperatura y humedad AM2302	24
2.1.6. Tarjeta de desarrollo PIC 40P	25
2.1.7. Puente controlador USB a Serial PL-2303	25
2.1.8. Módulo de comunicación Bluetooth-Serial	26
2.1.9. Multímetro	27
2.1.10. Flujómetros	27
2.1.11. Baño térmico	27
2.1.12. Fuente de poder	27
2.2. Creación de la interfaz por medio de LabView	29
2.3. Concentración de un gas	32
2.4. Implementación del sistema	33
2.4.1. El sistema estático	34
2.4.2. El sistema dinámico	35

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
2.4.3. El sistema del filtro de humedad	36
2.4.4. Celdas de medición	37
3. Resultados	42
3.1. Sistema estático	42
3.2. Modelo de respuesta del filtro de PVC	46
3.3. Sistema dinámico	50
3.3.1. Evaporación de etanol	50
3.3.2. Respuestas del sensor TGS-2620	51
4. Análisis	57
4.1. Dependencia del Sensor TGS-2620 a la temperatura y humedad	57
4.2. Respuesta transitoria	59

Resumen

El objetivo del proyecto es la implementación de un sistema que mida la respuesta transitoria del sensor de estado sólido TGS-2620 al etanol y su dependencia a la temperatura y humedad. 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 para esto se verificará el modelo de un sistema de primer orden.

Un componente que se utilizó en el proyecto es el microcontrolador PIC o Peripheral Interface Controller. Un microcontrolador es un circuito integrado programable. Para medir la respuesta del sensor TGS-2620 se utilizó el PIC-16F877A ya que este cuenta con módulos necesarios para llevar a cabo el proyecto tales como el convertor analógico digital y la comunicación serial asíncrona.

Se realizaron mediciones en el sistema dinámico para caracterizar el tiempo de respuesta en su estado transitorio tomando en cuenta la temperatura y humedad. Posteriormente se analizó y ajustó a un sistema de primer orden. De esta forma se pretende predecir la respuesta en estado estable del sensor a partir de la medición de los puntos iniciales de la respuesta transitoria.

Capítulo 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 del glomérulo olfatorio (yuxtaglomerulares y gliales) receptoras tienen baja sensibilidad (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, necesita de un ambiente preparado en algunos casos y además se necesita tener el cuidado de evitar compuestos tóxicos ya que podría haber consecuencias graves en muestras que contengan elevadas concentraciones o extensos tiempos de exposición a estas. Por esta razón es necesaria la disponibilidad de plataformas de sensores y sondas que realicen una detección temprana.

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].

Se han comercializado monitores de olor durante varios años , uno de los sensores usados para este objetivo es el sensor TGS-2620, en el que se han realizado varias pruebas sobre posibles usos que puede tener, entre ellos tenemos: la clasificación de vinos [6], el control de calidad de la carne [7], detección de dióxido de carbono (CO_2) [8] y la búsqueda de fuentes de gas en plataformas móviles [9, 10, 11, 12] y en plataformas fijas [13, 14].

1.2. Justificación

Pensando en que la respuesta transitoria podría contener información adicional sobre los compuestos analizados el acercamiento más común ha sido estudiar las características el estado estable en conjunto con las características de la respuesta transitoria, mejorando el desempeño de los análisis pero siendo inadecuado por el tiempo de espera del estado estable. El objetivo que se ha tratado de alcanzar es sustituir las características del estado estable por las de la respuesta transitoria.

Ha habido intentos para modelar la respuesta transitoria en los sensores de gas, por medio de sumas de dos decaimientos exponenciales [15], o de decaimientos multi-exponenciales [16], incluso se ha propuesto modular la temperatura mientras se analiza la respuesta transitoria al aplicar una forma de onda escalonada a diferentes temperaturas de observación calculando una distribución continua de constantes de tiempo [17]. Uno de los métodos usados para realizar predicciones de la respuesta transitoria es el de "reservoir computing (RC, por sus siglas en inglés)", en el que se compara una señal de entrada a una base de datos y asignar una señal de salida deseada [18], cuyo inconveniente es el uso extenso de memoria y procesamiento, aumentando el costo de los dispositivos y haciendo imposible su uso en plataformas móviles.

Otro acercamiento ha sido usar el valor máximo del promedio exponencial móvil (ema, por sus siglas en inglés) de la respuesta de la resistencia eléctrica de los sensores de óxidos metálicos. Esta característica contiene un parámetro α que controla la

disponibilidad del valor pico en el tiempo y la calidad del proceso de extracción de datos[19], teniendo el problema de que no se puede tener una calidad alta junto con la presentación temprana del valor máximo.

Siadat ha mostrado que se pueden aprovechar 4 características de las respuestas de sensores de óxido metálico con el objetivo de evaluar concentraciones: La diferencia entre la respuesta en el estado estable y los primeros segundos de la respuesta a la exposición del gas, la superficie debajo de la respuesta de los primeros 5 minutos, calculando la pendiente de los primeros puntos y el valor máximo de la respuesta derivativa (calculando las pendientes de todos los puntos obtenidos de la respuesta transitoria y el estado estable), haciendo comparaciones de resultados obtenidos de técnicas como el análisis de componentes principales y el análisis discriminante [20]. También se ha usado este último análisis en conjunto con las características extraídas de la transformada wavelet calculada a partir de la respuesta transitoria de una nariz electrónica que consta de 4 sensores TGS-2620 paralelizados con temperatura modulada[21].

Anteriormente se observó que el sensor TGS-2620 tiene un comportamiento de un decaimiento exponencial [22], esto da la oportunidad de facilitar el análisis de los datos obtenidos para encontrar predicciones rápidas con la única constante de tiempo del sensor y la pendiente obtenida de los primeros puntos medidos sin usar bases de datos, análisis de componentes principales, análisis discriminante, algoritmos de aprendizaje y comparación ahorrando tiempo de cálculo necesario para la detección de compuestos en plataformas móviles [9, 12].

1.3. Objetivos

Objetivo general

1. Análisis de la respuesta transitoria de un sensor de gas TGS-2620 y su dependencia con la temperatura y la humedad.

Objetivos particulares

1. Implementación de un filtro de humedad en el sistema dinámico.
2. Caracterización del filtro de humedad.
3. Mejoramiento del conversor analógico digital.
4. Realización de mediciones en un ambiente con humedad y temperatura controladas.
5. Modelación de la respuesta transitoria.

1.4. 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.

1.4.1. 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.

1.4.2. Decaimientos exponenciales

Para ajustar una curva medida con el mejor resultado, las funciones base deben tener el mismo comportamiento básico que la curva de respuesta. Las funciones exponenciales tienen esta propiedad y en otros estudios se han utilizado para modelar curvas de respuesta escalonadas [23]. Una función exponencial da un buen ajuste para una curva de monótona creciente, usando sólo dos parámetros [24] en la ecuación 1.1.

$$Y = A \left(1 - \exp \left(-\frac{a}{T} \right) \right) \quad (1.1)$$

1.4.3. Sistema de orden cero

Un sensor de orden cero es aquel cuya salida está relacionada con la salida mediante la ecuación 1.2.

$$y(t) = kx(t) \quad (1.2)$$

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.

1.4.4. 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 ecuación 1.3.

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (1.3)$$

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

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_1 s + a_0} \quad (1.4)$$

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 ecuación 1.4 que se conoce como la función de transferencia.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (1.5)$$

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 ecuación 1.6.

$$Y(s) = \frac{k}{s} - \frac{k}{s + \frac{1}{\tau}} \quad (1.6)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace a cada uno de los términos se encuentra la respuesta en el tiempo a una entrada escalón como se muestra en la ecuación 1.7.

$$y(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (1.7)$$

Donde t es el tiempo.

1.4.5. Humedad Relativa

La humedad relativa puede definirse de dos maneras, ya sea la proporción entre la presión que ejerce el vapor de agua e a la presión de vapor de saturación e_s en la ecuación 1.8

$$RH = 100 \frac{e}{e_s} \quad (1.8)$$

o también puede verse como la relación entre la proporción de mezcla de masa seca de vapor de agua real w con la proporción de mezcla de saturación w_s a la temperatura y presión ambiente en la ecuación 1.9

$$RH = 100 \frac{w}{w_s} \quad (1.9)$$

Las dos definiciones están relacionadas por $w = \varepsilon e (P - e)^{-1}$ y $w_s = \varepsilon e_s (P - e_s)^{-1}$, donde ε (0.622) es la razón de las masas moleculares del agua y el aire seco y P es

la presión del aire del ambiente. Para varias aplicaciones ambas definiciones son equivalentes ya que normalmente $e < e_s \ll P$. La temperatura a la que el paquete de aire a la temperatura inicial t y presión P deben ser enfriados isobaricamente para volverse saturado es t_d , la temperatura de rocío. Normalmente la definición esta expresada implícitamente en términos de la presión del vapor en la ecuación 1.10

$$e_s(t_d) = e(t) \quad (1.10)$$

Una forma sencilla y bien conocida de obtener e_s puede ser obtenida al resolver la ecuación de Clausius-Clapeyron (ecuación 1.11)

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{Le_s}{R_w T^2} \quad (1.11)$$

donde la T es temperatura en Kelvin ($T = t + 273.15$), R_w es la constante de gas para el vapor de agua ($461.5 \text{ J } ^\circ\text{K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) y L es la entalpía de vaporización que varía entre $L = 2.501 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ a $T = 273.15 \text{ }^\circ\text{K}$ y $L = 2.257 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ a $T = 373.15 \text{ }^\circ\text{K}$. Suponiendo que L es aproximadamente constante sobre el rango de temperatura encontrado en la atmósfera baja podemos integrar la ecuación 1.11 para obtener la ecuación 1.12

$$e_s = C_2 \exp\left(\frac{-L/R_w}{T}\right) \quad (1.12)$$

donde C_2 depende de la referencia de temperatura a la cual el valor de L es elegida, por ejemplo $C_2 = 2.53 \times 10^{11} \text{ Pa}$ a $T = 273.15 \text{ }^\circ\text{K}$. Sustituyendo 1.12 con las ecuación 1.10 en la ecuación 1.8 y despejamos t_d obtenemos la ecuación 1.13

$$T_d = T \left[1 - \frac{T \ln\left(\frac{RH}{100}\right)}{L/R_w} \right]^{-1} \quad (1.13)$$

que nos da una buena aproximación a la conversión de RH a t_d [25].

Para convertir la humedad relativa a humedad absoluta, es decir, la masa de vapor de agua contenida en un volumen de aire comenzamos con la ecuación 1.14.

$$AH = \frac{m_v}{V} \quad (1.14)$$

Usando la ley de los gases ideales gases ideales (ecuación 1.15).

$$PV = \frac{m}{M} RT \quad (1.15)$$

donde P es la presión, V es el volumen, m es la masa, M es la masa molar R es la constante universal de los gases ideales ($8.314472 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$) y T es la temperatura. En el caso del vapor de agua tenemos la ecuación 1.17.

$$eV = mR_v T \quad (1.16)$$

donde R_v es la constante de gas específica para el vapor de agua ($461.54 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$). Entonces podemos escribir la proporción masa a volumen como la ecuación .

$$\frac{m}{V} = \frac{e}{R_v T} \quad (1.17)$$

que es la humedad absoluta.

1.4.6. Sensores de gas

Recientemente se ha incrementado el uso de sensores de gas en varios sistemas inteligentes con fines tanto industriales como académicos. Éstos se emplean para la detección de compuestos tóxicos contaminantes en el ambiente [26], la simulación del sistema olfativo humano [27], supervisión de la calidad del aire en interiores [28], control de calidad en los alimentos [29], estudios ambientales [30]. Las tres mayores áreas que reciben atención son la investigación de diferentes tipos de sensores, principios de detección y técnicas de fabricación [31].

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, está 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 [32]:

- 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.

1.4.7. 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 [33]. 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 [34].

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 [35].

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 [36].

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 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 [37] y una relativamente baja selectividad [38][39]. 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.

1.4.8. Sensor TGS-2620

El sensor empleado en el proyecto pertenece a la serie TGS, fabricada de la empresa Figaro, contiene una película de óxido de aluminio que posee una alta sensibilidad al etanol. Un circuito electrónico simple como el divisor de voltaje puede convertir el cambio en la conductividad a una señal de salida que corresponda al cambio de concentración. Son adecuados especialmente para aplicaciones en detectores de fugas de gases tóxicos y explosivos. El elemento sensitivo de los sensores de la serie TGS está compuesto de un óxido metálico semiconductor formado típicamente por SnO_2 (en el caso del sensor TGS-2620 por un sustrato de alúmina Al_2O_3), cuando esta placa se calienta a cierta temperatura en aire, el oxígeno es adsorbido en la superficie de cristal con una carga negativa. Entonces los electrones en la superficie del cristal son transferidos al oxígeno adsorbido dejando cargas positivas en una capa de cargas espaciales. Así, el potencial superficial está formado para servir como una barrera de potencial contra el flujo de electrones (Figura 1.1) [40].

La corriente eléctrica fluye a través de las partes de la conjunción de los microcristales de SnO_2 . En las fronteras de grano el oxígeno se adsorbe, es decir, queda retenido en la superficie. También forma una barrera de potencial que evita que los portadores puedan moverse libremente. La resistencia eléctrica del sensor se atribuye a esta barrera de potencial. En la presencia de un gas desoxidante, la densidad superficial del oxígeno cargado negativamente decrementa, así que la altura de la barrera de las fronteras de grano se reduce. La altura de la barrera reducida decrementa la resistencia del sensor.

Dentro del sensor TGS-2620 hay una placa de detección junto a un calefactor integrado. En la Figura 1.2 presenta el estado físico del sensor, mientras que en la Figura 1.3 se ve el esquema de conexiones, los pines que tienen los números 1 y 4 del calefactor no tienen polaridad.

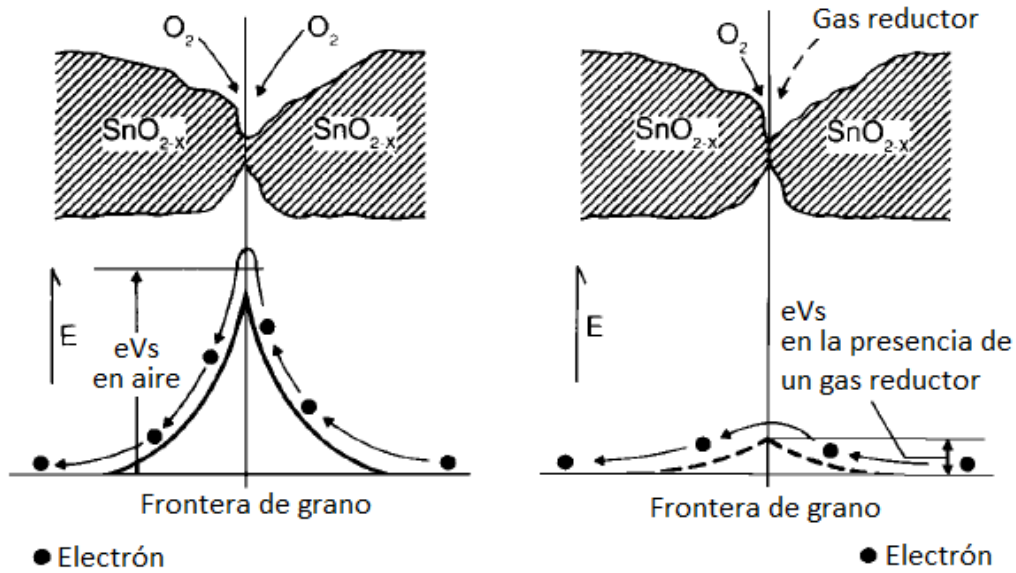


Figura 1.1. Modelo de barrera de potencial entre granos: a) en ausencia de gases, b) en presencia de gases [40].

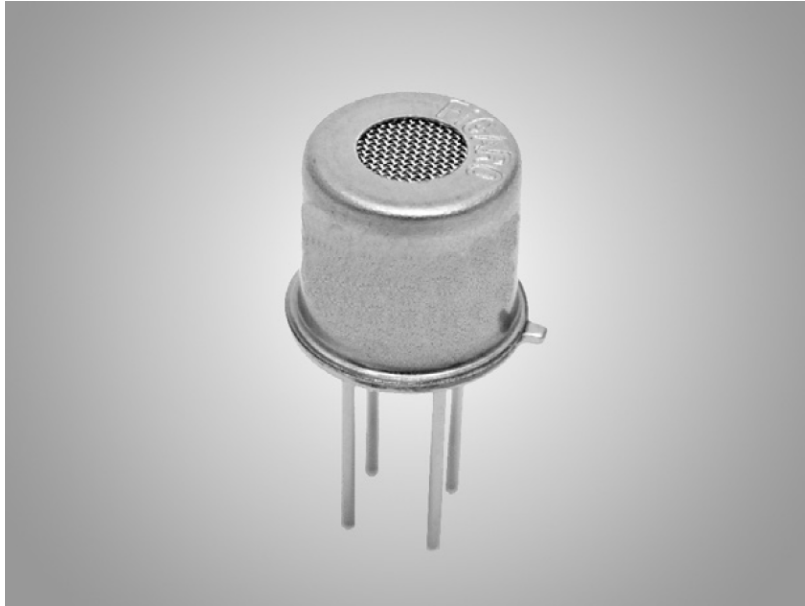


Figura 1.2. Sensor TGS-2620 [41].

En la presencia de un gas detectable la conductividad disminuye 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 es sensible a los vapores de

otros compuestos volátiles 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.

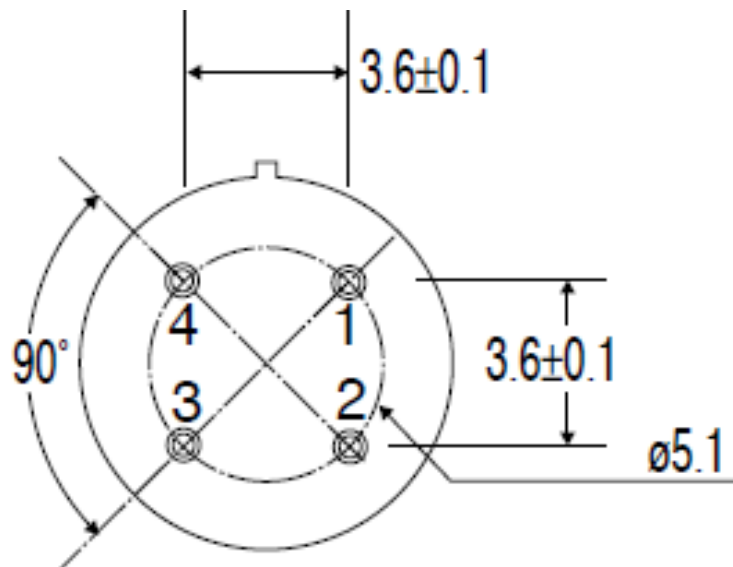


Figura 1.3. Esquema de conexión de pines: 1) Calefactor. 2) Electrodo negativo. 3) Electrodo positivo. 4) Calefactor [41].

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 [11], 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 [11].

Gracias a la respuesta y disponibilidad de los sensores de la serie TGS son usados en las narices electrónicas. No obstante, las principales desventajas de este tipo de sensores son su tiempo de recuperación lento, deriva por los cambios de humedad

y temperatura en el ambiente y la potencia de consumo.

Las pendientes de subida y bajada de la curva de respuesta del sensor muestran su rendimiento y la detección del olor. Por esta inspección 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.

1.4.9. Respuestas de sensores

En la Figura 1.4a 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 1.4b, 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.

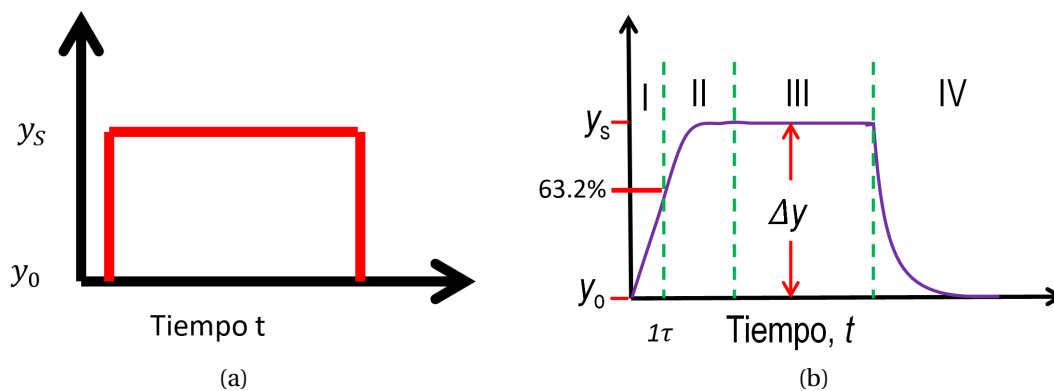


Figura 1.4. a) Estímulo de entrada como una función escalón b) Respuesta de la salida del sensor.

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 $e^{-t/\tau} < 0.01$ [22].

El modelo se puede definir como en una función exponencial de acuerdo a la ecuación 1.18.

$$R = R_1 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1.18)$$

Donde el componente de la izquierda define el estado estable y la constante de tiempo τ determina el componente transitorio.

Al derivar y evaluar la derivada en el tiempo igual a cero tenemos la ecuación 1.19.

$$R_1 = \tau \left. \frac{dR}{dt} \right|_{t=0} \quad (1.19)$$

Esto nos da la capacidad de predecir el valor del estado estable que es igual al tiempo τ multiplicado por la pendiente de la función cuando el tiempo es cercano a cero. Esto nos da la posibilidad de conocer la diferencia de las repuestas que existen entre dos estímulos en un sensor tiempo antes de que alcance su estado estable [15].

Dependencia a la temperatura y humedad

Las condiciones ambientales pueden modificar la respuesta del sensor TGS-2620, la figura 1.5 muestra la dependencia a la temperatura y humedad. El eje Y indica la proporción de la resistencia del sensor a 330 ppm de etanol bajo varias condiciones atmosféricas (R_s) a la resistencia del sensor a 330 ppm de etanol a 20 °C/65 %RH (R_0). Puede notarse de esta gráfica que la respuesta del sensor aumenta al disminuir la temperatura y la humedad.

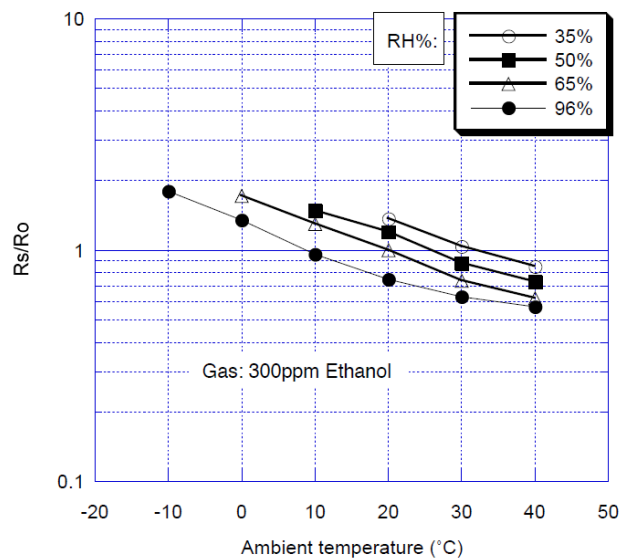


Figura 1.5. Dependencia a al temperatura y humedad [41].

Pre calentamiento del sensor

Al energizar al sensor TGS-2620 después de tenerlo almacenado sin conectarlo a la corriente eléctrica se observa una respuesta llamada acción inicial [41][11]. Esta respuesta no esta relacionada a la presencia de compuestos orgánicos volátiles, la resistencia del sensor disminuye bruscamente y después llega a un nivel estable dependiendo a las condiciones atmosféricas (Figura 1.6). Por esta respuesta se recomienda retrasar el inicio de la toma de respuestas.

La hoja de especificaciones de los sensores de concentración de la serie TGS [40] nos indica que estos sensores deben tener un tiempo de pre calentamiento de dos días como mínimo aunque también recomienda fuertemente que el pre calentamiento se prolongue hasta 7 días en una atmósfera limpia. Se ha encontrado en otro trabajo [42] una prueba sobre la estabilidad de la resistencia del calefactor del sensor TGS-2602 cuyos resultados se muestran en la Figura 1.7 al encenderlo durante el día y apagarlo las primeras tres noches y al mantenerlo encendido durante más tiempo. Puede notarse en las últimas mediciones mostradas en la gráfica que ambos sensores tienen una resistencia del calefactor estable, de esta manera se pueden obtener resultados que sean reproducibles.

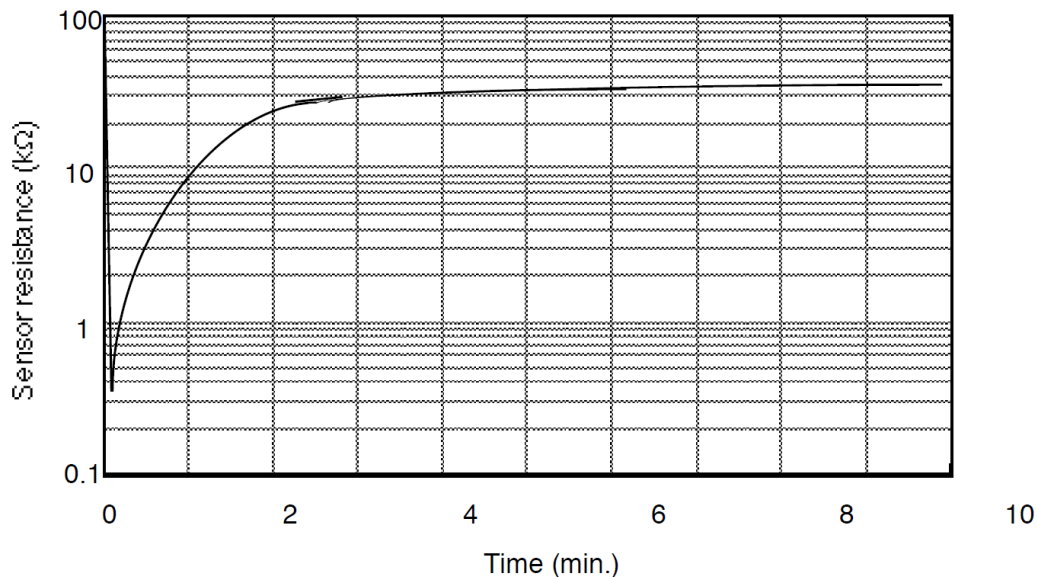


Figura 1.6. Respuesta de la acción inicial [41].

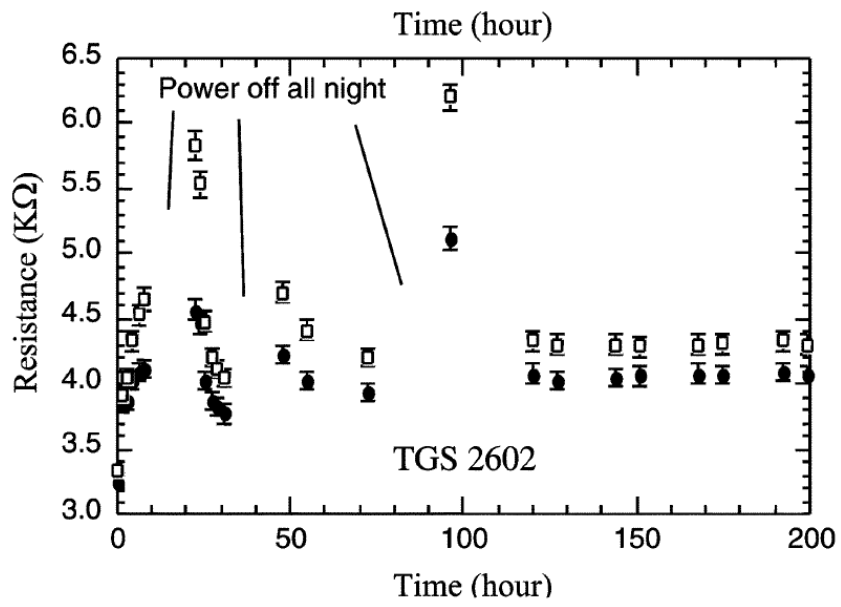


Figura 1.7. Resistencia contra tiempo durante el proceso de precalentamiento en aire sintético en dos sensores TGS-2602[42].

Capítulo 2

Desarrollo experimental

En esta sección se trataran 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 personal pero a una menor escala y con prestaciones limitadas. Los microcontroladores se emplean para dirigir el funcionamiento de tareas determinadas. Debido a su reducido tamaño suelen estar incorporados en los dispositivos portátiles.

Los microcontroladores son 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 [43].

El PIC16F877A

El PIC-16F877A (Figura 2.1) 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 [43]. 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.

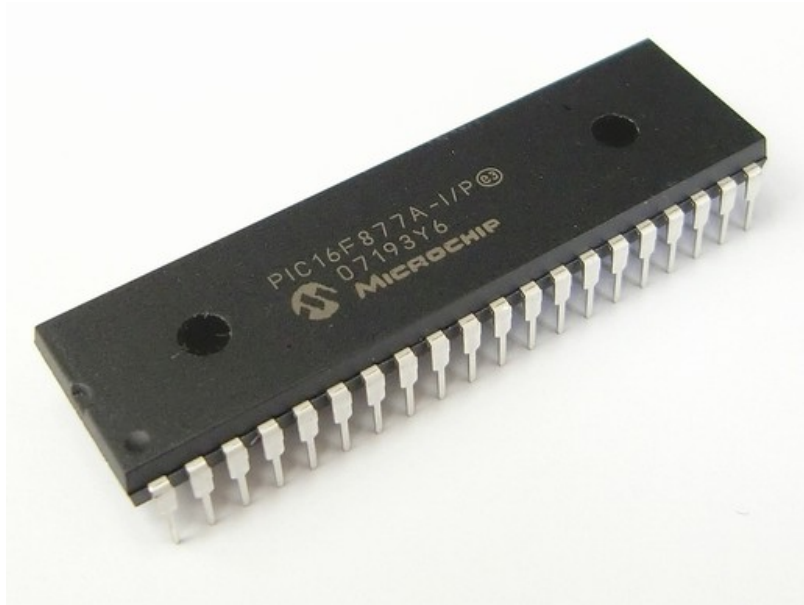


Figura 2.1. PIC16F877A [44].

El conversor analógico digital

Los microcontroladores PIC16F877A poseen un conversor analógico-digital (CAD) 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 la ecuación 2.1.

$$Resolución = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{1024} = \frac{V_{ref}}{1024} \quad (2.1)$$

En el presente trabajo la V_{ref+} fue de 5 VDC y la V_{ref-} fue la conexión a 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 2.2 en la parte final del experimento.

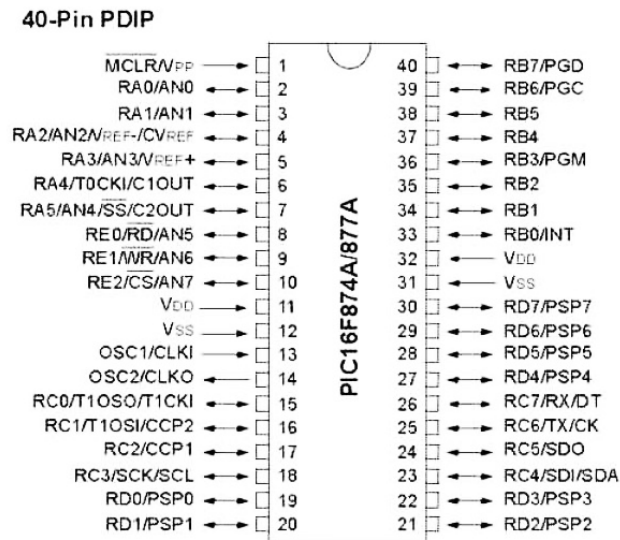


Figura 2.2. Diagrama de conexión de pines del PIC-16F877A [44].

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 2.3 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 2.2 los pines usados en el PIC para transmisión y recepción de datos son el 25 y 26 respectivamente, uno de finalización (STOP).

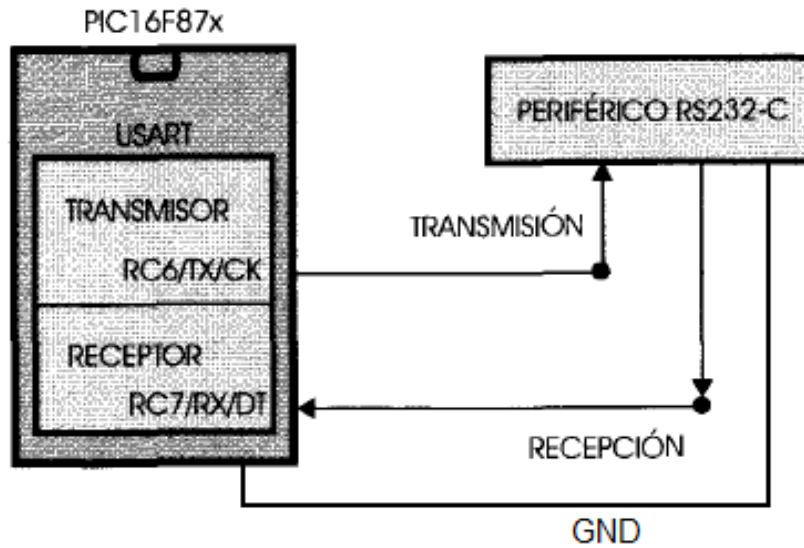


Figura 2.3. Esquema del modo de comunicación asíncrona del USART [43].

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 2.4.

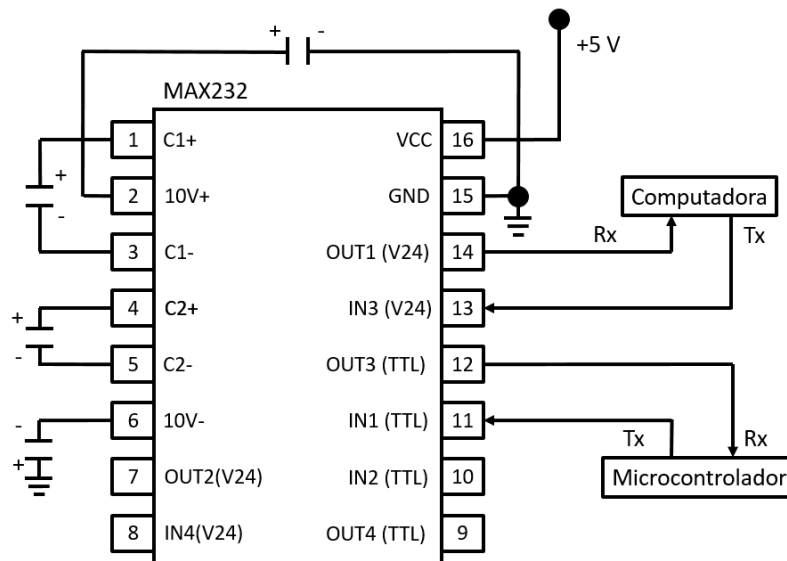


Figura 2.4. Diagrama de conexión para comunicación de puerto serial.

El circuito integrado tiene salidas para manejar niveles de voltaje del RS-232 (aprox. $\pm 7.5 V$) 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 [45].

Las entradas de recepción de RS-232 (las cuales pueden llegar a $\pm 25 V$), 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 analógico de humedad HIH-4030

Elaborado por la empresa Honeywell, es un sensor de humedad de circuito integrado cubierto (Figura 2.5), da una respuesta de humedad relativa con una calidad suficiente para instrumentación, usa un elemento capacitivo sensible que consta de un polímero termoendurecible con un acondicionador de señal integrado en el chip [46]. La construcción multicapa del elemento sensitivo provee una excelente resistencia a la mayoría de los problemas tales como la condensación, polvo, la suciedad y los químicos ambientales comunes. Entre sus características convenientes para este proyecto se pueden encontrar:

- Diseño de baja potencia.
- Tiempo de respuesta rápido.
- Estable, desempeño con baja deriva.
- Químicamente resistente.
- La salida de voltaje con respecto a la humedad relativa es aproximada a un comportamiento lineal 2.6.

La humedad relativa del sensor está dada por la ecuación 2.2:

$$Sensor RH = \frac{V_{out} - zero-offset}{pendiente} \quad (2.2)$$

Donde $zero-offset = 0.958 V$ y $pendiente = 30.680 mV / \%RH$

A partir de este resultado debe hacerse una compensación de temperatura como se muestra en la ecuación 2.3

$$True RH = \frac{(Sensor RH)}{1.0546 - 0.00216 * T} \quad (2.3)$$

Donde T es la temperatura en $^{\circ}C$.



Figura 2.5. Sensor HIH-4030.

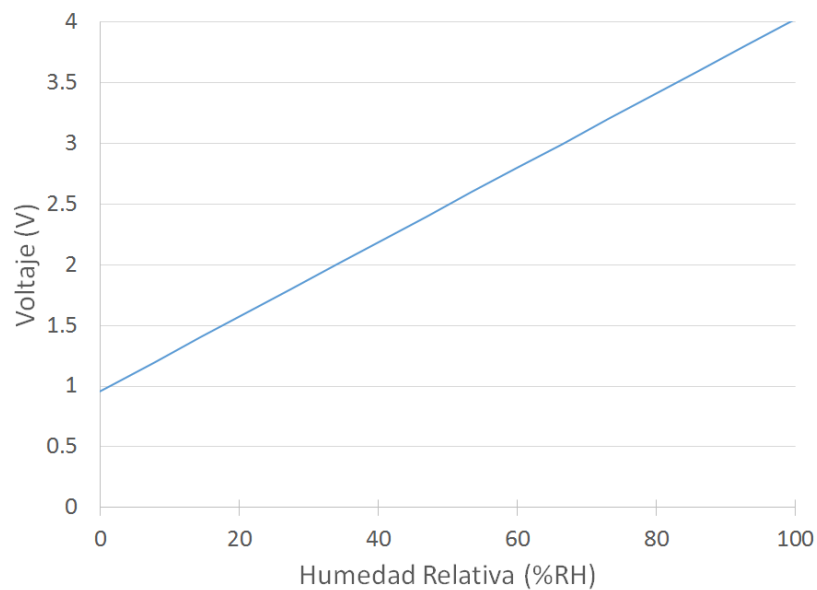


Figura 2.6. Salida de voltaje contra humedad relativa a 25°C y 5V [46].

2.1.4. Sensor analógico de temperatura LM-35

Este sensor mostrado en la Figura 2.7 tiene una salida de voltaje linealmente proporcional a la escala de temperatura centígrada. La ventaja que tiene sobre otros sensores de temperatura lineales calibrados en la escala Kelvin es que no el usuario no necesita restar un valor grande de voltaje de la salida [47].



Figura 2.8. Módulo de temperatura y humedad AM2302.

El sensor incluye componentes capacitivos y dispositivos de medición de temperatura de alta precisión conectados a un microcontrolador de 8 bits de alto desempeño. El módulo tiene una excelente calidad, respuesta rápida a los estímulos, una fuerte capacidad anti-interferencia a un alto costo. La interfaz de un solo bus de comunicación tiene un sistema de integración fácil y rápido con un bajo consumo de potencia [48]. Puede ser aplicado en industria de automotores, humidificadores, equipamiento de pruebas e inspecciones, bienes de consumo, controles automáticos, registradores de datos, reguladores de humedad, electrodomésticos, estaciones meteorológicas.

2.1.6. Tarjeta de desarrollo PIC 40P

Como una medida para evitar el ruido en la comunicación entre los diversos sensores y el PIC-16F877A se usó la tarjeta PIC 40P (Figura 2.9), que tiene pines y jumpers organizados de manera que su identificación en las conexiones es sencilla y fue diseñada conforme a las funciones que los pines realizan, aunque limita la cantidad de pines reservados al conversor analógico digital a cinco [49].

2.1.7. Puente controlador USB a Serial PL-2303

Para la comunicación serial entre la nueva tarjeta PIC 40P y la computadora se usó una tarjeta que contiene el dispositivo adaptador de comunicación USB-serial que contiene una interfaz de transferencia de datos asíncrona, con una velocidad compatible a las especificaciones USB 2.0 y un regulador de 5.0 V a 3.3 V [50].

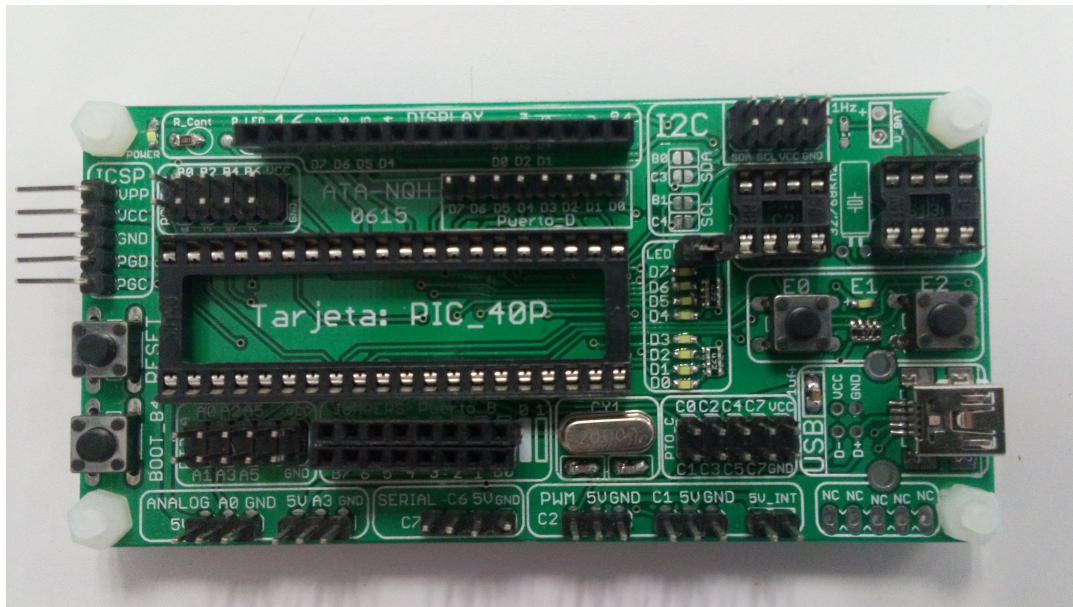


Figura 2.9. Tarjeta de desarrollo PIC 40P.

2.1.8. Módulo de comunicación Bluetooth-Serial

El módulo de comunicación HC-05 2.10 contiene un protocolo Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) sencillo de usar diseñado para una configuración de conexión serial inalámbrica. El módulo del puerto contiene la versión Bluetooth V2.0+EDR completa de 2.4 GHz. Usa un sólo chip de sistema Bluetooth con tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) y AFH (Adaptive Frequency Hopping Feature)[51].

Algunas de las características que contiene son:

- Sensibilidad a 80 dBm
- Transmisión de potencia hasta +4 dBm RF
- Operación de baja potencia, 1.8 a 3.6 V
- Interfaz UART con velocidad de baudios programable
- Antena integrada
- Conector de borde
- Habilitación como Maestro o esclavo

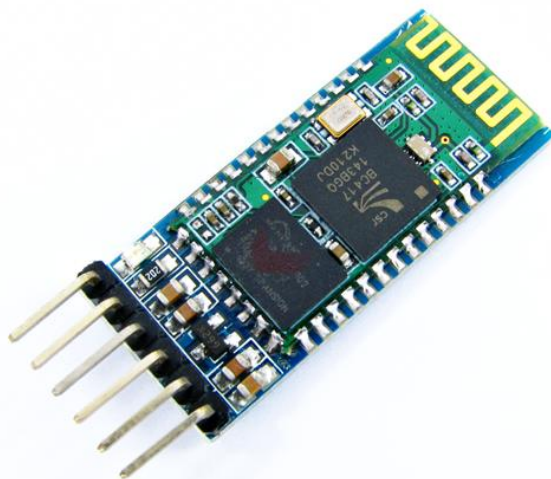


Figura 2.10. Módulo de comunicación HC-05.

2.1.9. Multímetro

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 [52]:

$$\begin{aligned} -20\text{ }^{\circ}\text{C a } 200\text{ }^{\circ}\text{C}: & \pm(1.0\%lect + 2\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ 200\text{ }^{\circ}\text{C a } 750\text{ }^{\circ}\text{C}: & \pm(3.0\%lect + 2\text{ }^{\circ}\text{C}) \end{aligned}$$

2.1.10. Fluómetros

Para controlar el flujo de aire en el experimento se usaron dos fluómetros Aalborg GFC17, con capacidad para regular velocidades desde 0 ml/min a 500 ml/min . Con una precisión de $\pm 1.0\%$ a escala completa [53].

2.1.11. 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 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una estabilidad de temperatura de $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ [54].

2.1.12. Fuente de poder

Las fuentes de poder usadas en el experimento se construyeron en el Laboratorio de Optoelectrónica y tienen un rango de voltaje de 0 V a 30 V , puede pasar una

corriente capaz de llegar a una magnitud de 3 A.

2.2. 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.



Figura 2.11. 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. Estas señales llegan al periférico MAX 232 para su posterior conversión.

En este trabajo se usó la herramienta de desarrollo LabView para programar la interfaz de usuario, en esta se puede observar la situación de las mediciones en tiempo real y también puede almacenar los datos de la respuesta del sensor en un archivo. En la Figura 2.11 pueden notarse las graficas que se dibujan en el transcurso de una

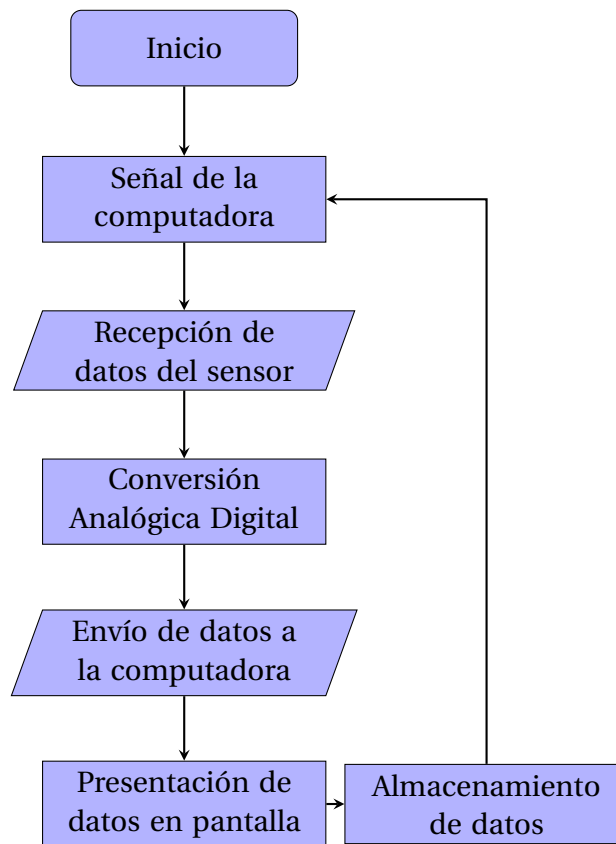


Figura 2.12. Diagrama de flujo del sistema usado para la medición de la respuesta del sensor.

de las mediciones. El tiempo está expresado con respecto a la razón de muestreo, gracias a que estas se actualizan cada vez que un nuevo dato llega a la computadora el progreso de las mediciones es más fácil de interpretar. Durante este proyecto se llevaron a cabo razones de muestreo a una velocidad de 5 muestras por segundo. Debajo de las gráficas hay un cuadro en el que se puede seleccionar el puerto de comunicación de la computadora y el tiempo en el que se tomarán las muestras. A un lado se encuentra un botón para empezar la medición que se ha configurado y otro botón para detener el programa.

En el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 2.12 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 con-

siste 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.

2.3. Concentración de un gas

La concentración es la medida de la proporción de una sustancia dada se encuentra en una mezcla de dos o más sustancias, en el caso de este proyecto el etanol diluido en el aire. Las unidades en las que se expresa esta relación son las partes por millón o *ppm*, como el nombre indica debe haber una diferencia de un orden de magnitud de 10^6 entre las masas o volúmenes de las sustancias que se comparan. En este proyecto la variable física que se puede detectar es la concentración del vapor de etanol diluido en el aire, por lo que es necesario tomar en cuenta las condiciones ambientales en un factor de conversión k como se muestra en la ecuación 2.5.

$$k = \left(\frac{22.4 \text{ L/mol}}{M} \right) \left(\frac{273 \text{ K} + T}{273 \text{ K}} \right) \left(\frac{P}{760 \text{ mmHg}} \right) \quad (2.5)$$

donde M es la masa molar del etanol (46.06844 g/mol) que se compara con el volumen molar que ocupa un mol de gas ideal en el espacio en condiciones normales. T es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y P es la presión del aire en mmHg . Las unidades que resultan de k son l/g .

El etanol empleado en los experimentos se almacena en viales (frascos pequeños) que se introducen en una cámara de evaporación a temperatura constante. De esta forma la velocidad de evaporación al etanol esta controlada. Este cambio de estado esta expresado en la ecuación 2.6.

$$D_r = \frac{m \times 10^6}{t} \quad (2.6)$$

siendo m el cambio de la masa de la muestra en kg y t el tiempo en minutos. Considerando la proporción de la concentración multiplicamos la masa por un orden de magnitud de 10^6 , por lo que la velocidad de evaporación D_r se expresa en $\mu\text{g/min}$. Al tener la evaporación del analito y los factores ambientales contemplados podremos obtener la concentración a diferentes flujos en la ecuación 2.7.

$$C = \frac{kD_r \times 10^3}{F} \quad (2.7)$$

donde F es el flujo en ml/min , D_r es la velocidad de evaporación en $\mu\text{g/min}$ y k es el factor de conversión en l/g . Multiplicamos un orden de magnitud de 10^3 para convertir l en ml , de esta forma cancelamos varias unidades y nos quedamos con $\mu\text{g/g}$ o escrito de otra forma *ppm*.

Para calcular la concentración en un sistema estático se utiliza la ecuación 2.8.

$$C = \frac{(22.4 \text{ l/mol})\rho T_S V_l \times 10^3}{(273 \text{ K})PMV_g} \quad (2.8)$$

donde ρ es la densidad de la muestra líquida en g/ml , T_S es la temperatura de la cámara en K , 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. Multiplicamos por 10^3 para convertir el V_l en nl , así obtenemos nl/ml conservando la proporción necesaria para las *ppm*.

2.4. Implementación 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 PIC, este analiza la información y el PIC enviara esta información procesada a través del protocolo serial hacia la PC.

La Figura 2.13 muestra este circuito básico del sensor. El sensor TGS-2620 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 ecuación 2.9 que describe al divisor de voltaje formado por R_S y R_L , podemos ver que en el caso de que la resistencia del sensor aumente el voltaje de medida disminuirá y viceversa.

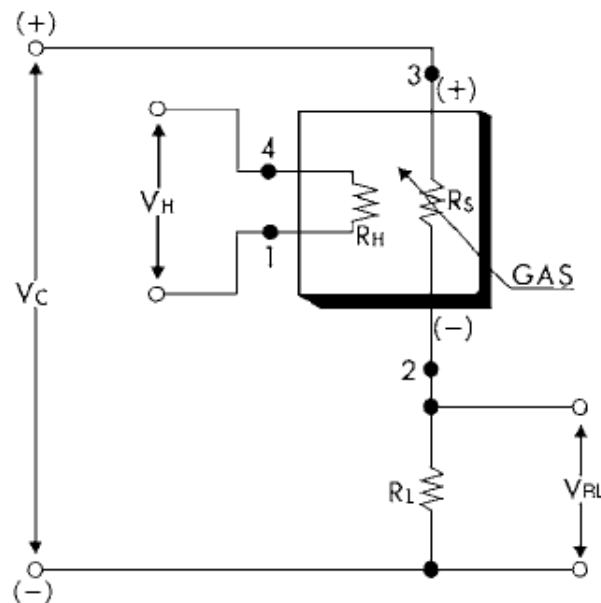


Figura 2.13. Conexiones del sensor dentro del circuito, un divisor de voltaje entre R_S y R_L . La señal enviada al PIC16F877A es enviada por el voltaje V_{RL} [41].

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 2.13. La resistencia de carga R_L regula el voltaje de salida, además de actuar como protector del sensor al regular la potencia de consumo (P_S) por debajo del límite de 15 mW . Una selección adecuada de la resistencia de carga habilita que el sensor pueda proveer de características uniformes para que estas

sean aprovechadas de una mejor manera. 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 $10\text{ K}\Omega$ 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:

$$V_{RL} = \frac{R_L}{R_L + R_S} V_C \quad (2.9)$$

Si despejamos la ecuación 2.9 podemos obtener el valor de la resistencia del sensor. La cual se muestra en la ecuación 2.10.

$$R_S = \frac{V_C - V_{RL}}{V_{RL}} R_L \quad (2.10)$$

2.4.1. El sistema estático

El sistema estático se muestra en la Figura 2.14, en él se miden las concentraciones de una muestra inyectada. La celda de mediciones hecha de teflón que se encuentra parcialmente sumergida en un baño térmico para mantener la temperatura constante y así la respuesta del sensor TGS-2620 introducido en la cámara sea reproducible. El sensor se conecta al conversor analógico digital que a su vez enviará las señales a la computadora mostrarlas en la interfaz y guardarlas en la memoria.

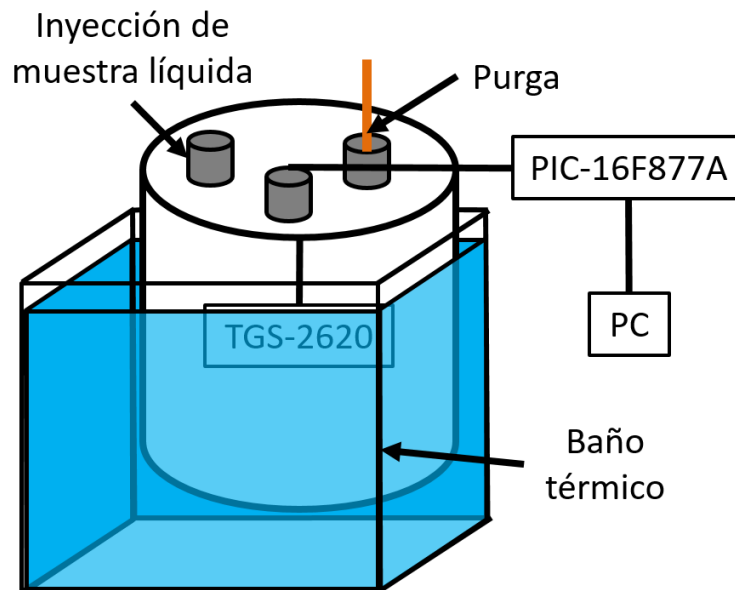


Figura 2.14. Dibujo del sistema estático.

Para conocer la respuesta del sensor TGS-2620 a diferentes concentraciones se inyectan a la celda de mediciones diferentes cantidades de volumen de etanol en lapsos regulares para dar tiempo a las muestras de evaporarse y al sensor de alcanzar

el estado estable. En 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 $0.5 \mu\text{l}$ cada vez hasta llegar a $5 \mu\text{l}$ y la otra serie consistió en inyecciones de $1 \mu\text{l}$ hasta llegar a $5 \mu\text{l}$ para después inyectar $5 \mu\text{l}$ para obtener $10 \mu\text{l}$ y continuar inyectando $10 \mu\text{l}$ por intervalos hasta llegar a $40 \mu\text{l}$. Debido a que la respuesta del sensor tiene una forma exponencial teniendo una menor diferencia en el voltaje a mayores concentraciones.

2.4.2. El sistema dinámico

Se pueden observar los componentes del sistema dinámico en la Figura 2.15. En el diagrama las flechas rojas indican la dirección del flujo de aire, mientras que las líneas azules representan las mangueras y las líneas negras los cables de los circuitos electrónicos. El sistema dinámico está formado por un baño térmico, dos bombas de aire unidas a filtros de humedad con sendos flujómetros que están conectados a un sistema de válvulas para llevar el gas al sensor. Un teclado esta conectado a un microcontrolador, de esa forma el usuario puede decidir las condiciones en la que se encuentra el sensor por medio del cambio del flujo y las válvulas. 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 necesitamos que llegue al sensor.

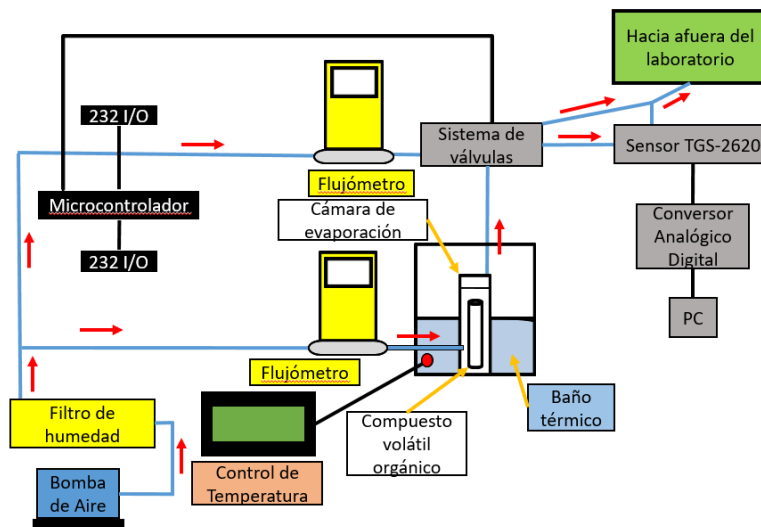


Figura 2.15. Dibujo del sistema dinámico.

Antes de realizar las mediciones de las respuestas dinámicas del sensor TGS-2620 ante la exposición de etanol, se debe encontrar la velocidad de evaporación (D_r) del

etanol que se encuentra en un vial dentro de una cámara de acero inoxidable parcialmente sumergida en un baño térmico para controlar la temperatura a la que el vial se expone. Gracias a esto se realiza la técnica de peso perdido la cual consiste en medir el peso del contenido del vial en intervalos de tiempo regulares mientras la muestra se somete a evaporación. 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 [22]. 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 ecuación 2.7. Puede notarse que al aumentar la velocidad de evaporación aumenta la concentración sucediendo lo opuesto si tomamos la velocidad del flujo.

2.4.3. El sistema del filtro de humedad

Al observar los datos proporcionados por el fabricante del sensor TGS-2620 [41] y por mediciones realizadas en trabajos anteriores [55] se ha notado que debido a la humedad existe una deriva de la respuesta del sensor. Para prevenir este problema se ha optado por crear un filtro de humedad de forma que esta se pueda mantener en un nivel bajo y constante. Se han probado filtros cuyas carcassas estaban hechas a partir de dos materiales diferentes PVC y acrílico. Los componentes que eliminan la humedad del aire son unas bolitas desecantes elaboradas a partir de gel de sílice, cuya fórmula química es $SiO_2 \cdot xH_2O + C_{25}H_{30}ClN_3$ u que tienen la propiedad de cambiar de color conforme absorben el agua que se encuentra en el aire. Cuentan con las siguientes especificaciones:

- Área específica: $600 - 800 \text{ m}^2/\text{g}$
- Tamaño promedio del poro: $20 - 22 \text{ \AA}$
- Densidad: $750 - 780 \text{ g/L}$
- pH: 2-3

El filtro de humedad consiste en un tubo que se llena de desecantes. Debido a su tamaño pequeño y para evitar que estos se salgan se coloca una malla en los extremos. Todos los componentes del sistema se unen por medio de mangueras de plástico. El flujo de aire se mueve pasando primero por la bomba de aire, de ahí pasa por el filtro de humedad donde se separará de las moléculas de agua, después pasa a través del sensor de humedad HIH-4030 para monitorear la humedad del aire. Al realizar las pruebas se coloca un flujómetro al final. En caso de no haber fugas en

todo el trayecto se puede asegurar que el flujo es el mismo en todo el sistema. Habiendo probado la efectividad del filtro este se te unirá al sistema dinámico apartando el flujómetro usado en la versión de prueba, ya que el sistema dinámico cuenta con sus propios flujómetros. El diseño del sistema de filtro de humedad se muestra en la Figura 2.16. Las flechas rojas indican el sentido en el que el aire atraviesa las mangueras, representadas por las líneas azules. El aire obtenido de la bomba pasará a través del filtro de humedad para después llegar al flujómetro para conocer el flujo que logra llegar al sensor de humedad.

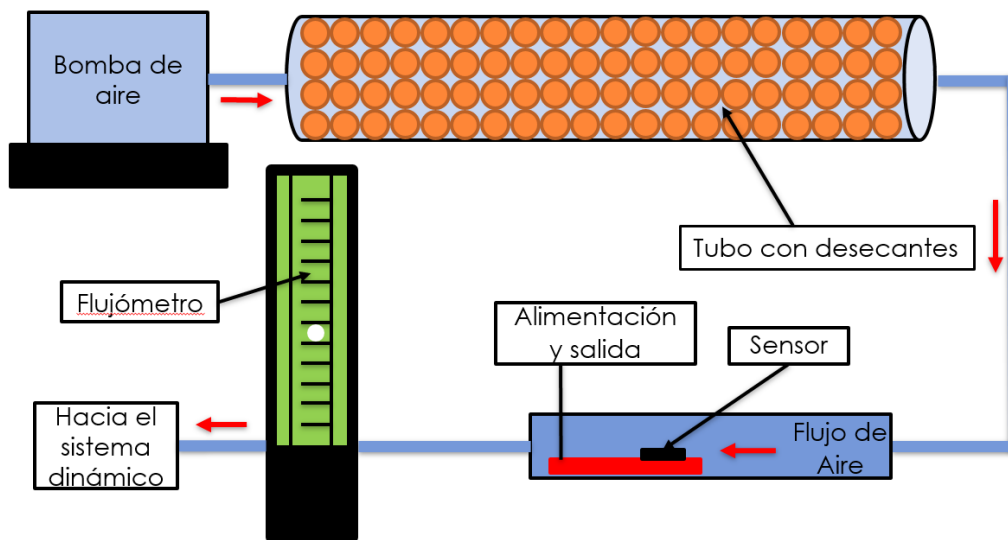


Figura 2.16. Diseño del sistema de filtro de humedad.

2.4.4. Celdas de medición

Con el propósito de mantener al sensor TGS-2620 en condiciones controladas de temperatura se diseñaron varias celdas de medición. El primer diseño que se realizó en el transcurso del proyecto se presenta en la Figura 2.17. Esta celda de mediciones se sumergiría en el agua teniendo cuidado de sellar correctamente las uniones con las tapas de caucho y los agujeros de conexión. Puede notarse que los cables que conectan los sensores con el resto del circuito se encuentran en el lado izquierdo mientras que los tubos que dirigen el aire hacia el sensor y lo evacúan fuera de la cámara se encuentran en la parte derecha.

El problema en el diseño de esta cámara es la creación de turbulencias dentro de ella ya que el aire que incide en el sensor no tiene una evacuación sencilla. Además, debido a que la sección transversal de la cámara es diferente al de las mangueras de aire las velocidades son distintas al momento de llegar al sensor. Por lo tanto se ensambló una cámara de medición de concentración cuyo diseño se encuentra en la

Figura 2.18. Esta cámara se sumergió en un baño térmico y en algunas mediciones el aire que atravesó las mangueras del sistema estático también cruzó por los filtros de humedad para comparar la respuesta del sensor a la humedad del ambiente y a la de los filtros de humedad.

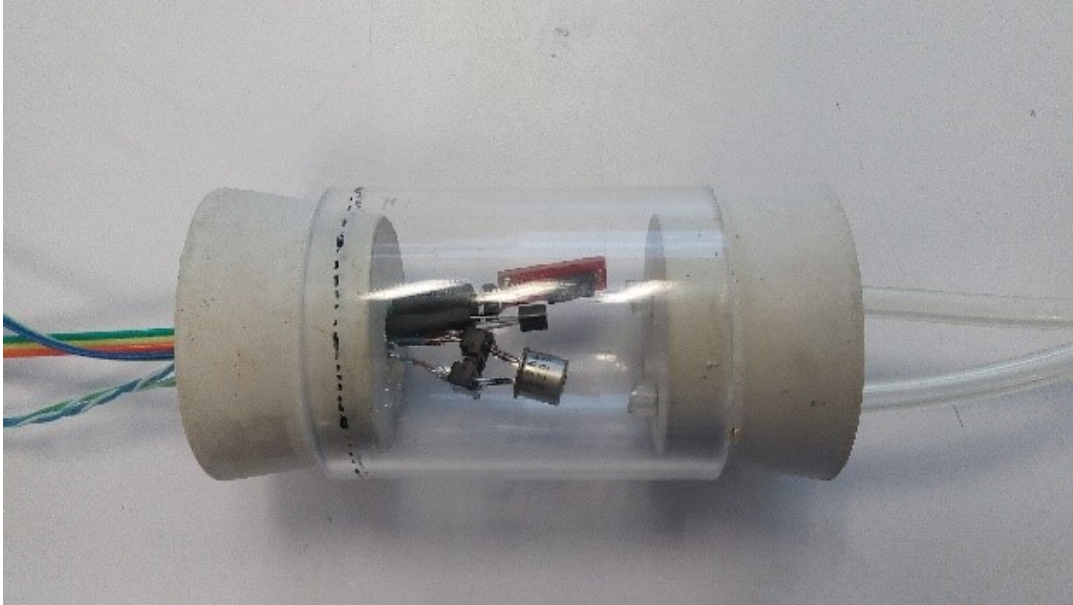


Figura 2.17. Celda de medición rechazada.

La implementación de este diseño se muestra en la Figura 2.19, este diseño debe ser sumergido en el baño térmico para mantener la temperatura constante en los sensores, para ese objetivo se unió un tubo de lastre. Después de efectuar mediciones aprovechando este diseño se encontró un problema en el análisis, en esta ocasión fue la distancia entre la celda de medición en el baño térmico y las válvulas del sistema dinámico que permiten el paso del aire. Entre mayor sea la distancia entre estas la velocidad de la respuesta transitoria del sensor TGS-2620 se verá influenciada al ser más lenta.

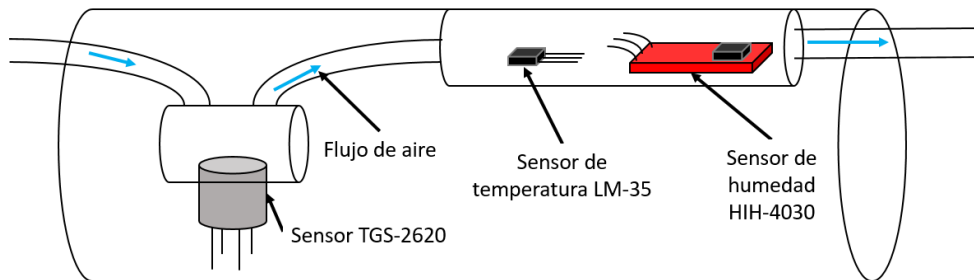


Figura 2.18. Diseño de la cámara de medición.

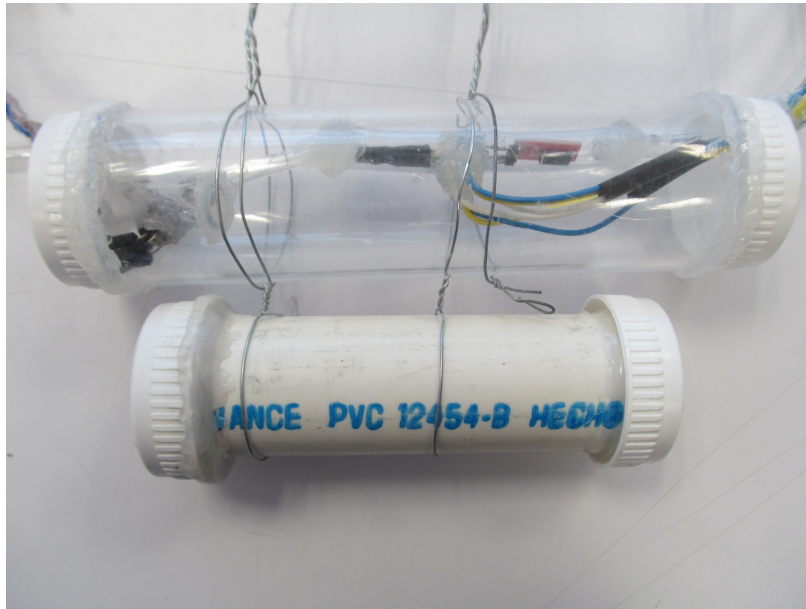


Figura 2.19. Celda de medición con lastre.

Para evitar el problema anterior fue necesario realizar un diseño en el que circule el agua que regule la temperatura mientras mantenga la distancia con las válvulas tan corta como sea posible. Para este propósito se diseñó la celda de medición de la Figura 2.20 para ser impresa en resina.

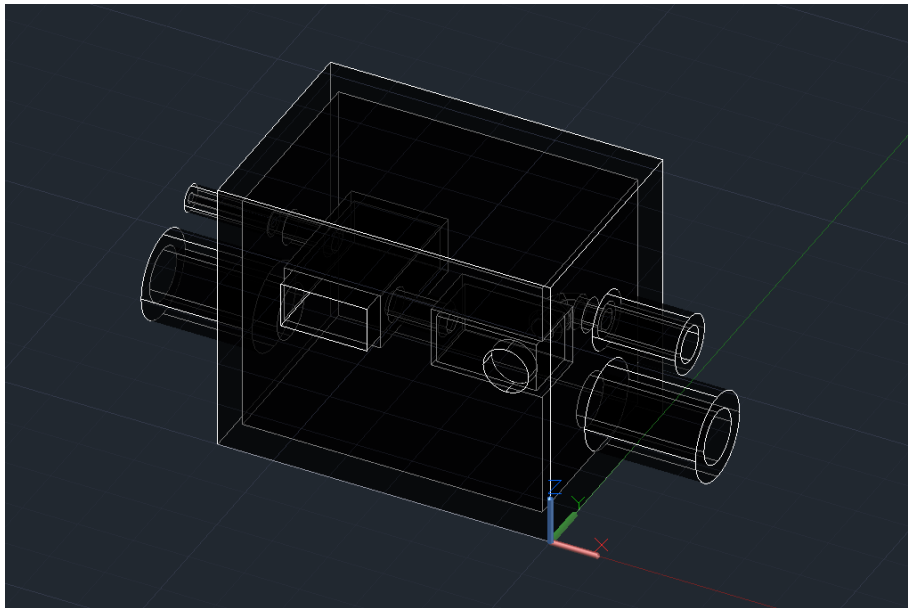


Figura 2.20. Representación en "rayos x" de la celda de medición.

Esta caja fue pensada para alojar las tuberías por las que pasaría el aire junto con las cámaras para los sensores TGS-2620 y el AM2302 en la parte superior mientras que en la parte inferior de la cámara se encuentran las entradas por las que circulará el agua que tiene como tarea regular la temperatura de los sensores. Gracias a esta última característica la ubicación de esta celda no depende del baño térmico ya que no necesita estar sumergida en este por lo que la distancia a las válvulas de aire es menor asegurando una menor influencia del sistema a la respuesta del sensor de concentración. También se consideró que el flujo del aire debe incidir directamente al sensor, las razones para tomar en cuenta esta característica se tratan en la siguiente sección.

El ángulo de incidencia

Durante un trabajo anterior [56] la cámara en la que el sensor TGS-2620 se encontraba estaba dentro de un recipiente sumergido en un baño térmico. Las uniones con las mangueras eran similares a las de la Figura 2.18 manteniendo una forma de "Y". En el transcurso de la investigación del presente trabajo se encontró que la dirección en la que el aire llega al sensor TGS-2620 es un factor determinante en la respuesta. En dicho trabajo [14] se muestra un sistema de detección de fugas de gas montado sobre una plataforma fija (Figura 2.21).

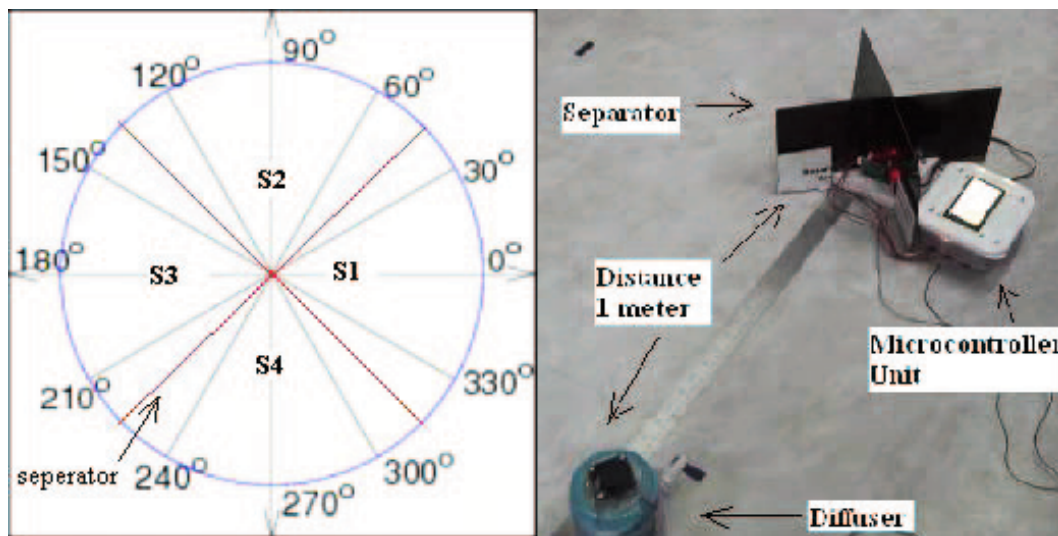


Figura 2.21. Brújula de olor con sensores y colocación de fuente de olor [14].

Esta plataforma contiene 4 divisiones y dentro de cada una de ellas se colocó un sensor TGS-2620. Conforme se gira la plataforma los sensores obtienen diferentes lecturas como se muestra en la Figura 2.22.

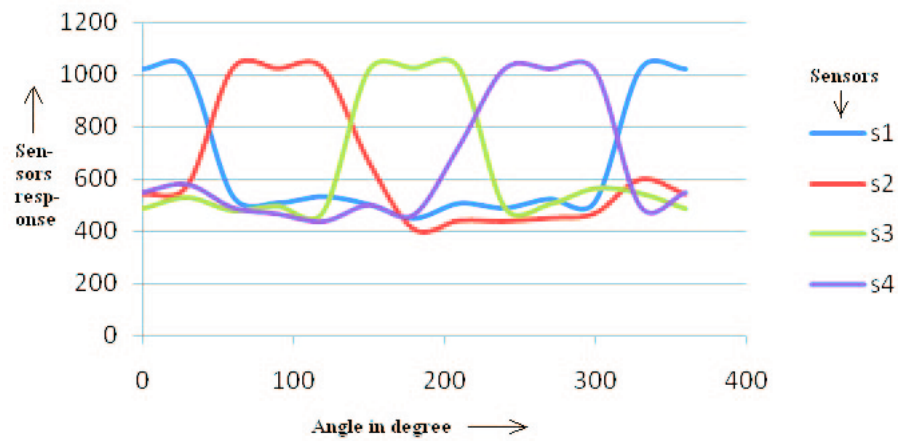


Figura 2.22. Variación en la respuesta de los sensores [14].

Puede verse que la respuesta del sensor TGS-2620 es máxima cuando el ángulo de incidencia es menor a 30° como también se menciona en [57].

Capítulo 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 3.1 que los lapsos dados para la estabilización de la respuesta del sensor no son suficientes para discernir escalones.

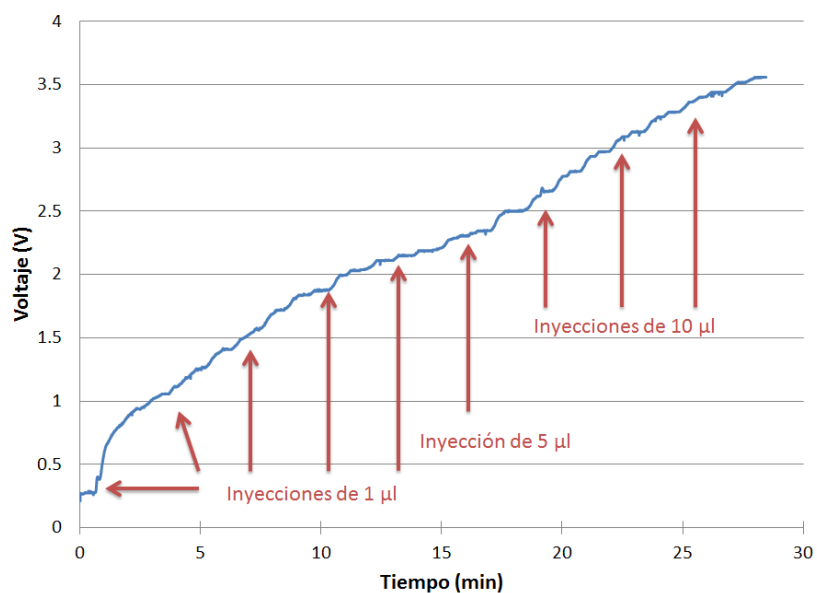


Figura 3.1. Medición en el sistema estático, con intervalos de tiempo de tres minutos entre inyecciones.

Por medio de varias pruebas se logró distinguir que se obtienen gráficas claras cuando se hacen inyecciones en intervalos de 10 minutos (Figura 3.2), 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.

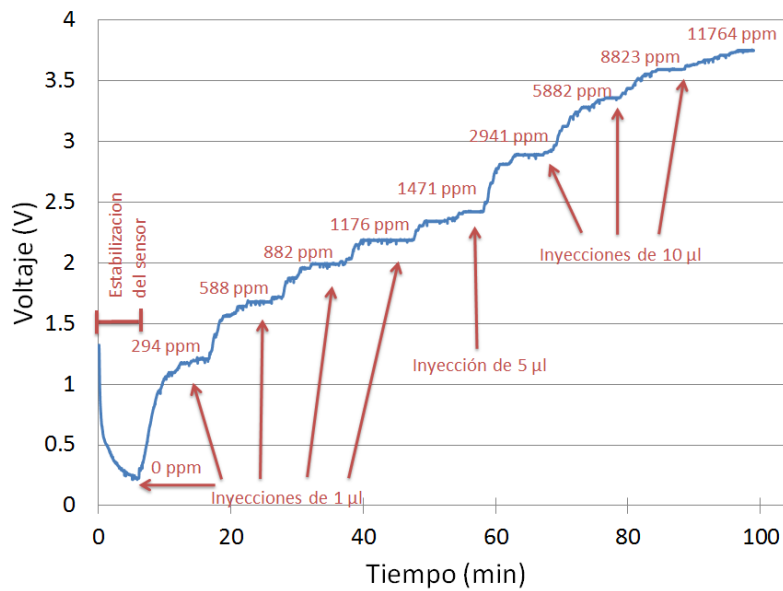


Figura 3.2. Concentraciones de las inyecciones en el sistema estático.

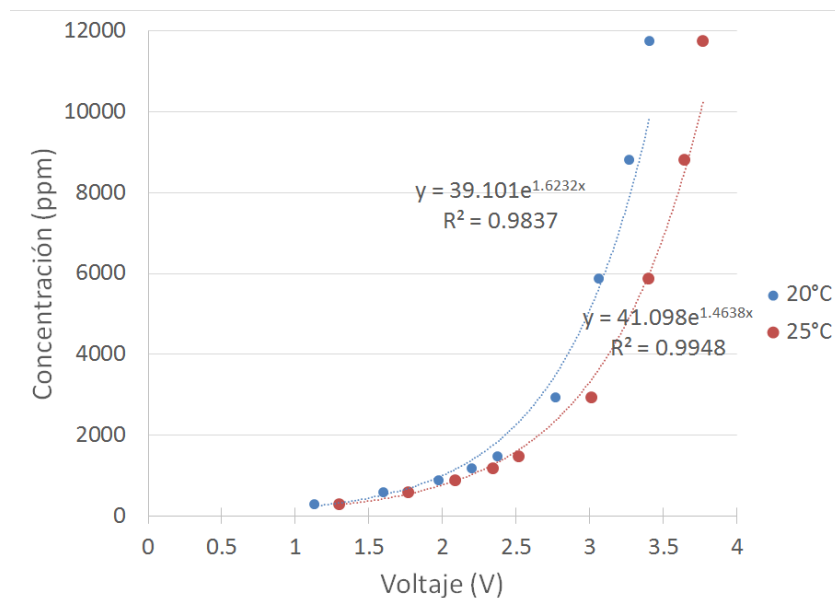


Figura 3.3. Ajuste exponencial de la respuesta del sensor TGS-2620.

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 3.3. Se observa que el comportamiento del sensor a diferentes concentraciones es exponencial, de acuerdo a las especificaciones dadas por el fabricante.

Si calculamos la proporción de la resistencia del sensor con la resistencia de carga podemos obtener la gráfica que está expuesta en la Figura 3.4. Si la comparamos con la versión de los valores del fabricante en la Figura 3.5 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.

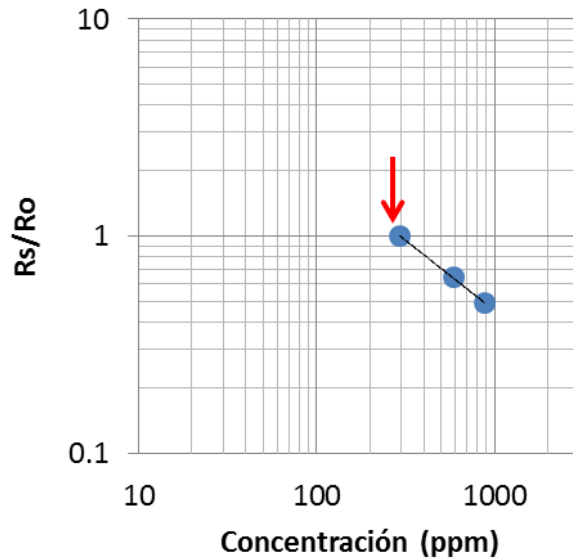


Figura 3.4. Razón de la resistencia del sensor entre la medición obtenida a 20°C.

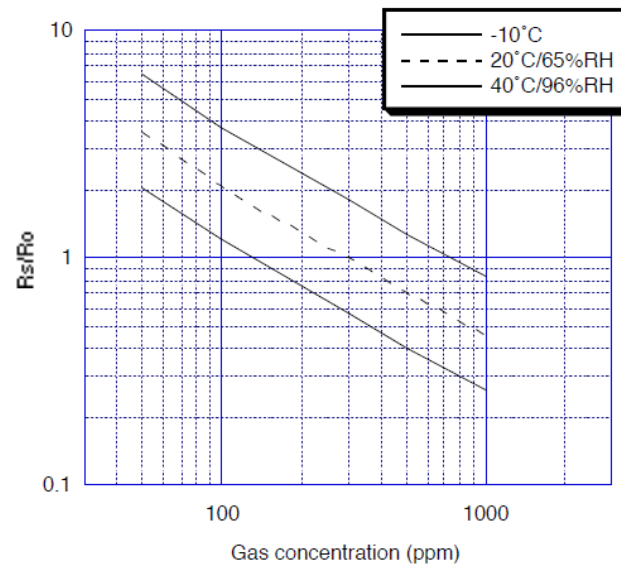


Figura 3.5. Razón de cambio de la resistencia del sensor [41].

3.2. Modelo de respuesta del filtro de PVC

Se ha observado a partir de varias mediciones que al originarse el flujo de aire dentro del sistema del filtro de humedad existen respuestas como las de un sistema de primer orden en el momento que se retira el estímulo como se muestra en la Figura 3.6, en este caso el estímulo está constituido como el porcentaje de humedad relativa. A esta respuesta se le realizó un ajuste con el algoritmo Gauss-Newton para regresiones no lineales. Se empleó la ecuación 1.18 pero obteniendo la forma apropiada que se muestra en la ecuación 3.1.

$$R = R_1 e^{-t/\tau} \quad (3.1)$$

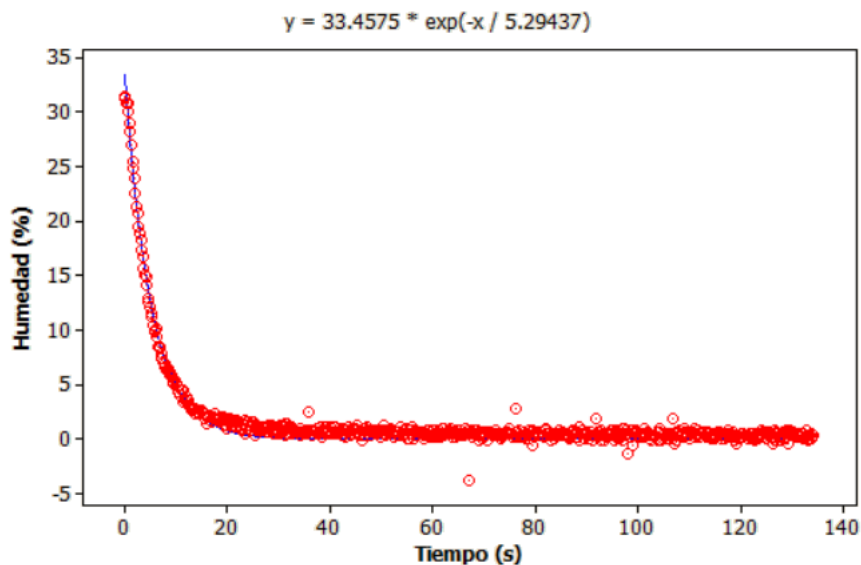


Figura 3.6. Gráfica con el ajuste de la respuesta del sensor HIH-4030.

La forma de conocer si el modelo que obtenemos es el óptimo debemos revisar la SSE (suma de los cuadrados del error residual) final y el valor de S (error estándar de la regresión), en la Tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos sobre las constantes de tiempo de 5 sensores HIH-4030. Esto se hizo con el objetivo de probar el funcionamiento correcto de ellos.

Se puede considerar que la respuesta está en el estado estable cuando el tiempo transcurre un valor cinco veces la constante del sensor (5τ). En este caso se puede decir que la respuesta alcanza su valor constante en al menos 26.5 s para la constante de tiempo más grande de la Tabla 3.1. En una medición posterior, debido a la

disponibilidad de los sensores y el valor similar entre las constantes de tiempo de estos para el caso del tubo de acrílico se tomó una medición a un flujo de 500 ml/min cuya constante de tiempo fue de 7.41 s por lo que se alcanza el estado estable en 37 s . Un tiempo de estabilización rápido si tomamos en cuenta el tiempo en el que la temperatura del sistema dinámico tarda en estabilizarse.

Tabla 3.1. Constantes de tiempo de 5 sensores HIH-4030.

	200 ml/min	500 ml/min
τ_1	4.69 s	4.60 s
τ_2	5.25 s	4.76 s
τ_3	5.29 s	4.75 s
τ_4	4.49 s	3.94 s
τ_5	4.86 s	4.21 s

Durante el transcurso del presente trabajo se observó que los sensores de temperatura y humedad LM-35 y HIH-4030 presentaban mediciones con mucho ruido por lo que se realizó la identificación de fuentes de ruido y se tomaron las precauciones para evitarlo, se logró disminuir al revisar las conexiones entre dispositivos como la fuente y el regulador además del zócalo en el que el PIC16F877 estaba colocado. Al final se conectó un filtro con capacitores de $10 \mu F$ a los sensores de temperatura y humedad como se muestra en el diagrama de la Figura 3.7.

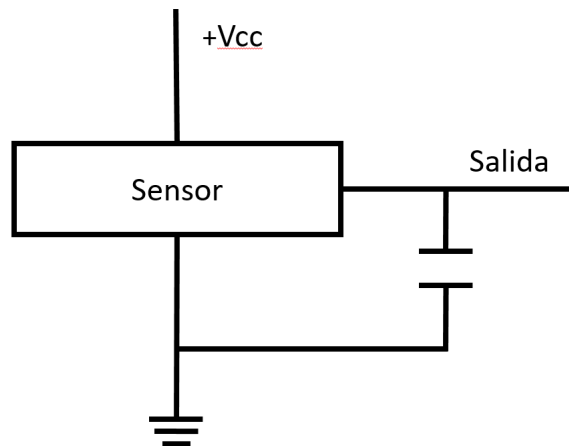
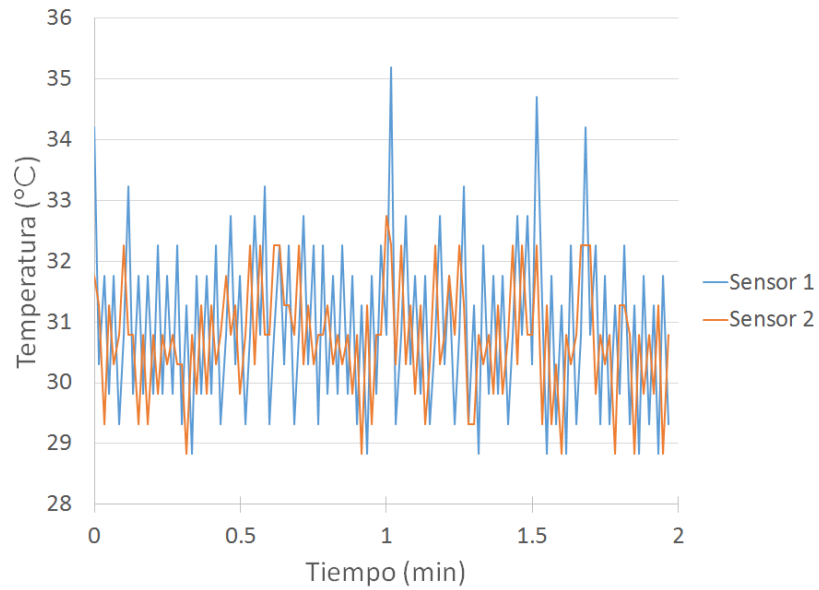
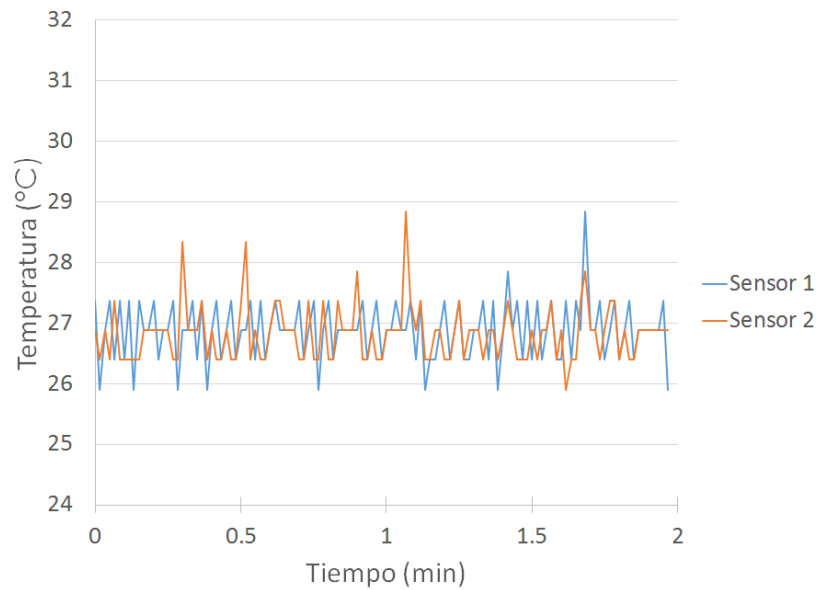


Figura 3.7. Diagrama del filtro conectado a los sensores.

En la Figura 3.8 se presentan dos mediciones efectuadas en ocasiones diferentes con dos sensores de temperatura LM-35 simultáneamente. En la Figura 3.8a se muestra la medición realizada sin conectar el filtro de capacitores mientras que en la Figura 3.8b se exhiben los resultados obtenidos después de conectar el filtro de capacitores. La respuesta en ambos casos es aleatoria pero en el segundo caso puede verse saltos de menor proporción que dependen de la resolución de 10 bits del PIC-16F877A, es decir, 4.88 mV . Ya que el sensor LM-35 presenta una conversión de $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ puede decirse que el PIC-16F877A puede detectar cambios de $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$.



(a)



(b)

Figura 3.8. a) Respuesta de los sensores de temperatura sin el filtro capacitivo. b) Respuesta de los sensores de temperatura con el filtro capacitivo, se puede notar menos ruido electrónico.

A partir de los datos registrados de la Figura 3.8 se obtuvo el promedio, la desviación estándar y error porcentual. Los cálculos obtenidos se muestran en la Tabla 3.2. En la que podemos ver la proporción en la que el ruido disminuye.

Habiendo asegurado la mínima presencia de ruido en el sistema se realizó una me-

Tabla 3.2. Comparaciones de mediciones del sistema de humedad.

Sensor	Con capacitores		Sin capacitores	
	1	2	1	2
Promedio	30.93	30.73	26.87	26.81
Desviación estándar	1.41	0.93	0.48	0.46
Error Porcentual (2σ)	9.1	6.1	3.1	3.4

dición de dos horas para probar la estabilidad del filtro. El resultado se muestra en la Figura 3.9. Se puede observar que sin importar la influencia del cambio de humedad en el ambiente el filtro ofrece una salida estable de aire con 0 % de humedad relativa durante al menos 2 horas.

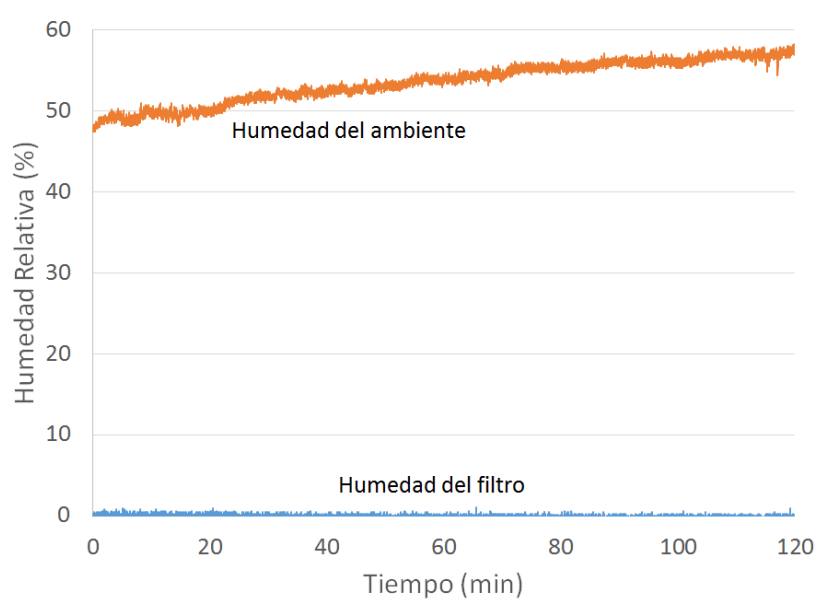


Figura 3.9. Comparación de la humedad del ambiente con la salida del filtro de humedad.

3.3. Sistema dinámico

Habiéndonos asegurado de tener caracterizados los sensores de concentración y los filtros de humedad podemos implementarlos en el sistema dinámico cerciorándonos del manteniendo constantes las condiciones en las que se llevarán a cabo los experimentos.

3.3.1. Evaporación de etanol

Para saber la concentración del etanol que pasa a través de las mangueras del sistema dinámico hasta el sensor TGS-2620 se requiere conocer la velocidad D_r a la que el etanol se evapora dentro de la cámara de evaporación. Para esto se requiere mantener el vial que contiene el etanol a una temperatura constante. Al medir la masa de etanol contenida en el vial a través del tiempo podemos observar la disminución de masa que presenta. A esto se le llama método de la masa perdida. En la Figura 3.10 pueden verse los ajustes de regresión lineal para las velocidades de evaporación de 30, 40 y 50 °C [56]. Los datos graficados corresponden al etanol que se evaporó del vial y no al etanol que permanece en este. Una conclusión que puede obtenerse de la gráfica es que a mayor temperatura mayor es la velocidad de evaporación del etanol, como es de esperarse.

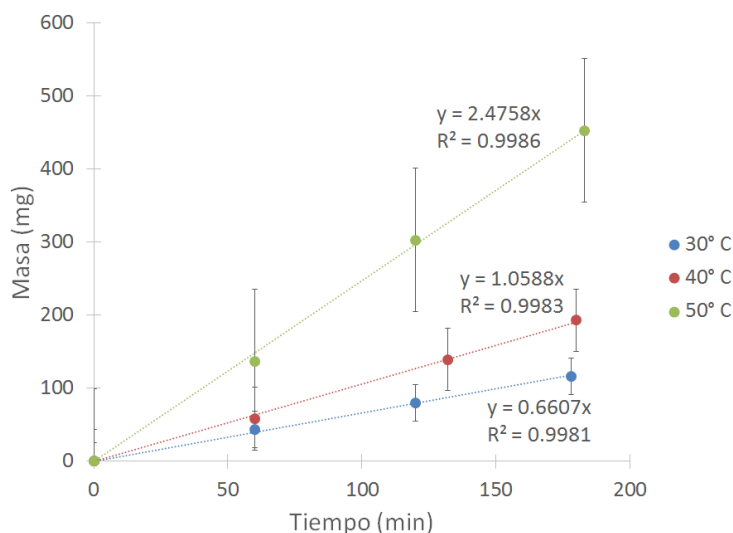


Figura 3.10. Velocidades de evaporación del etanol a diferentes temperaturas con sus respectivos ajustes lineales.

3.3.2. Respuestas del sensor TGS-2620

Usando la celda de medición de la figura 2.19 sumergiéndola en el baño térmico se realizaron mediciones a temperaturas de evaporación de etanol de 30 °C y 40 °C. La mitad de estas mediciones fueron realizadas con el filtro de humedad integrado, que aproximadamente proporcionaba un flujo con humedad del 6 %. El resto de las mediciones se realizaron sin el filtro por lo que se tomaba la humedad del ambiente. Para cada una de estas temperaturas se realizaron mediciones a flujos de 200, 300, 400 y 500 *ml/min*.

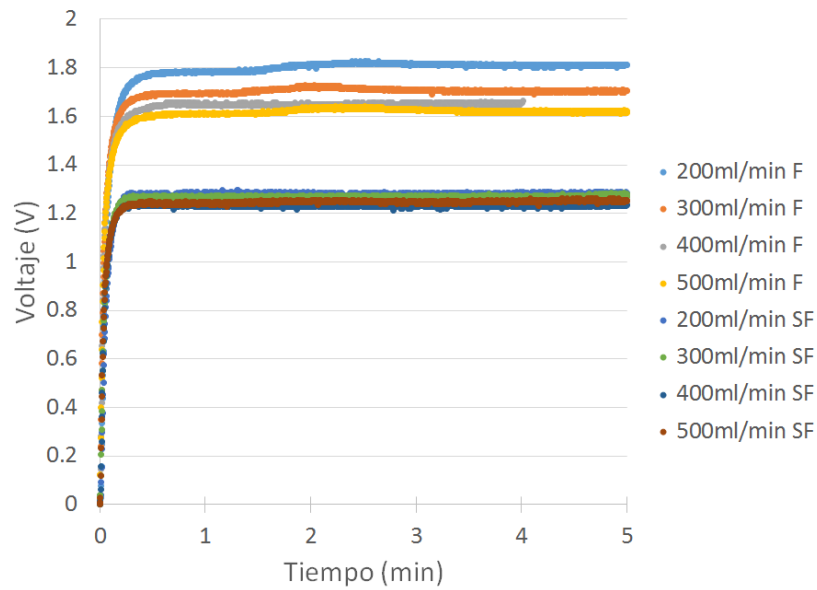
Mediciones con la celda de acrílico

Las pruebas tomadas a la temperatura de evaporación 30 °C incluyendo la respuesta transitoria y la respuesta en estado estable se muestran en la figura 3.11a mientras que en 3.11b se muestra el acercamiento a las respuestas en estado estable con sus respectivas constantes de tiempo y concentraciones calculadas para cada uno de estos casos a partir de la ecuación 2.7 y los datos de la Figura 3.10 para la temperatura de 30 °C.

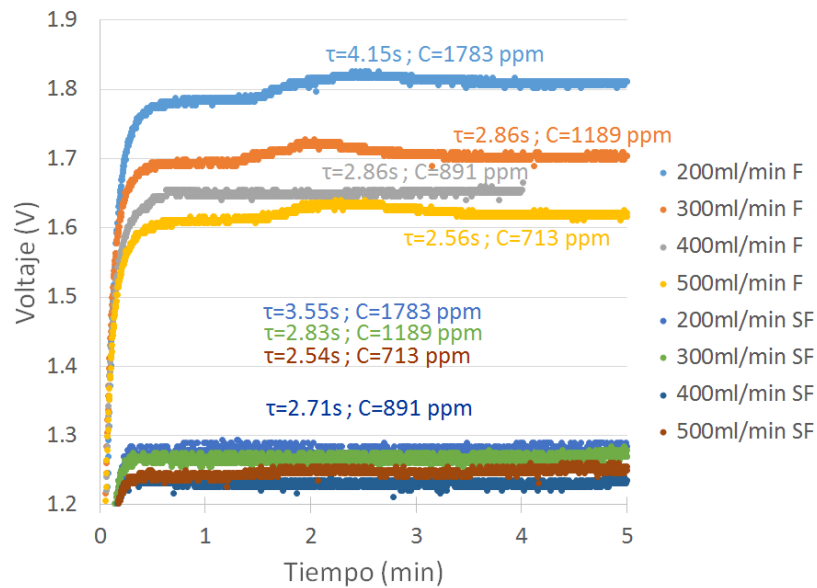
Tomando en cuenta la ecuación 2.7 que nos dice que a mayor flujo tendremos una menor concentración podemos ver que esta proporción se cumple para las mediciones hechas con el filtro de humedad excepto en el caso de las mediciones hechas con la humedad relativa tomada del ambiente en la velocidad de 400 *ml/min*.

En el momento en el que esa medición fue tomada la humedad relativa del ambiente aumentó un poco como se muestra en la figura 3.12, esto indica que la temperatura en el laboratorio pudo disminuir afectando la parte del sistema encargada de la evaporación del etanol ya que esta es sensible a los cambios de temperatura del ambiente.

Se realizaron pruebas a mayores concentraciones aumentando la temperatura de evaporación a 40 °C como se muestra en la Figura 3.13a, a diferencia de las mediciones hechas a 30 °C la respuesta del sensor corresponde a la curva producida por un sistema de segundo orden, siendo específicamente el caso de un sistema sobreamortiguado. Al no cumplirse la condición de un sistema de primer orden no se realizaron los ajustes de regresión correspondientes, por esta razón sólo se exponen las concentraciones de cada respuesta en la Figura 3.13b. Sabiendo que a mayores concentraciones tenemos respuestas de un sistema de segundo orden se evitó realizar mediciones a temperaturas de evaporación de 40 °C en posteriores mediciones.



(a)



(b)

Figura 3.11. Mediciones tomadas a una temperatura de evaporación de 30°C, donde F significa que el filtro de humedad fue añadido al sistema dinámico mientras que SF significa "Sin Filtro". En la Figura a) se muestra tanto la respuesta transitoria como la respuesta en el estado estable. En b) se muestra el acercamiento a las respuestas en el estado estable.

Mediciones con la celda de resina

Al cambiar la celda de medición anterior por la que se encuentra en la Figura 2.20 se realizaron nuevas mediciones obteniendo la ventaja de condiciones de hu-

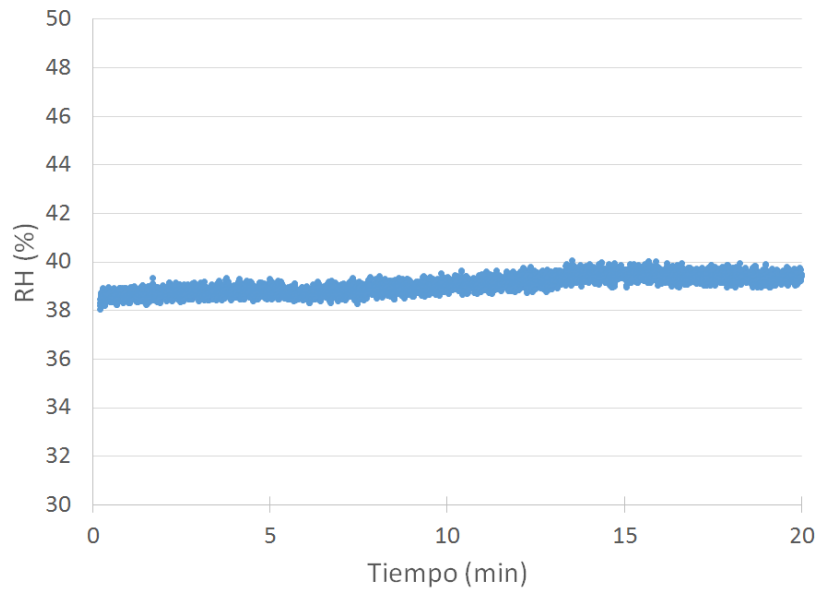


Figura 3.12. Aumento de la humedad relativa del ambiente.

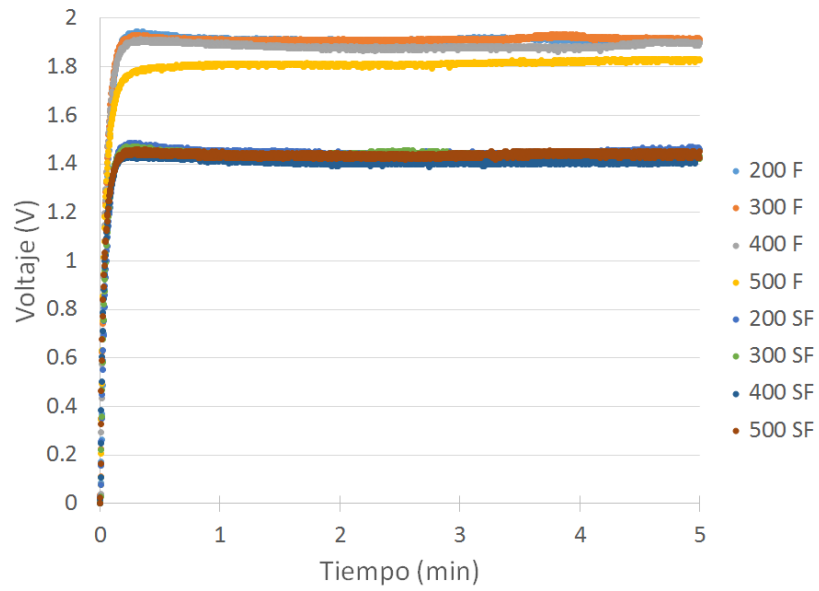
medad y temperatura mejor controladas. En estas nuevas mediciones solamente se usó la temperatura de evaporación de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ porque el baño térmico en el que se encuentra el etanol sólo se le puede aumentar la temperatura para controlarlo por lo que no puede ser menor a la del ambiente. Si se usan temperaturas de evaporación mayores se podrían obtener concentraciones mayores que nos lleven a la respuesta del sistema de segundo orden. También se usaron dos filtros de humedad diferentes que proporcionaban dos humedades absolutas diferentes en el flujo de aire.

Al conservar la misma velocidad de evaporación en los próximos casos podemos escribir sus respectivas concentraciones conforme a su flujo en la Tabla 3.3.

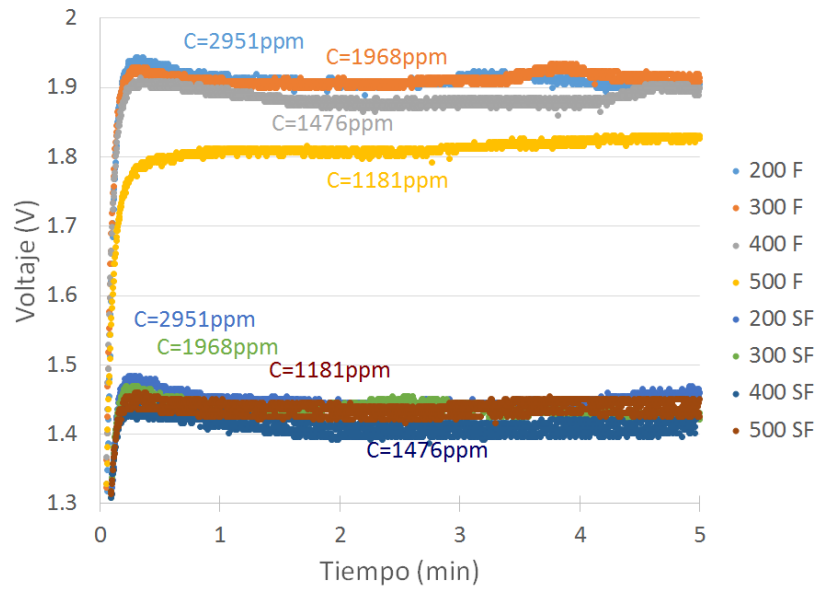
Tabla 3.3. Flujos del sistema dinámico con sus respectivas concentraciones.

Flujo	200 ml/min	300 ml/min	400 ml/min	500 ml/min
Concentración	1783 ppm	1189 ppm	891 ppm	713 ppm

En las Figuras 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17, se muestran las mediciones realizadas en varias condiciones desde temperatura y humedad: $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ con $21\text{ } \%RH$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ con $18\text{ } \%RH$, $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ con $27\text{ } \%RH$ y $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ con $14\text{ } \%RH$ respectivamente. De todas ellas vemos que la ecuación 1.18 del sistema de primer orden puede ajustarse a estas curvas. También se puede notar que la concentraciones concuerdan con los flujos como esta expresado en la ecuación 2.7.



(a)



(b)

Figura 3.13. Mediciones tomadas a una temperatura de evaporación de 40°C , donde F significa que el filtro de humedad fue añadido al sistema dinámico mientras que SF significa "Sin Filtro". a) Respuesta transitoria como la respuesta en el estado estable. b) Acercamiento a las respuestas en el estado estable.

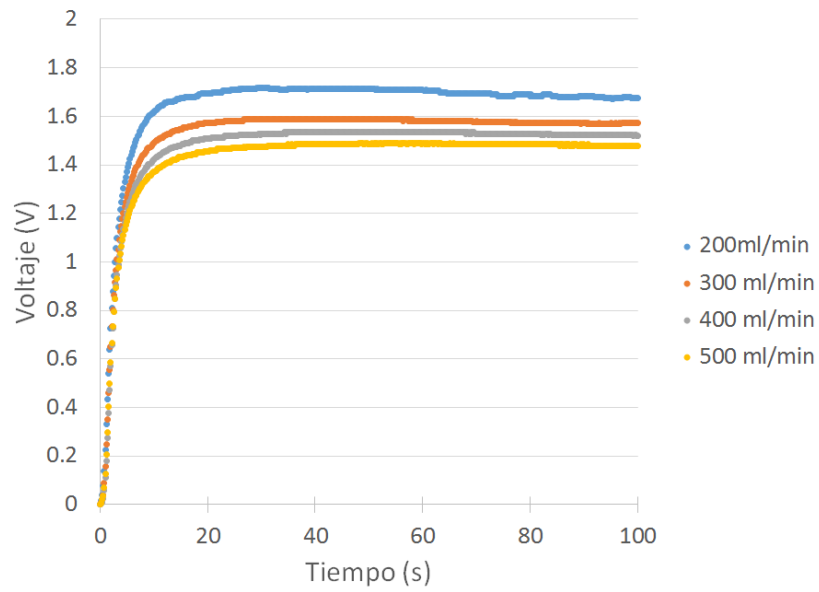


Figura 3.14. Respuesta obtenida a 21°C y 21%RH.

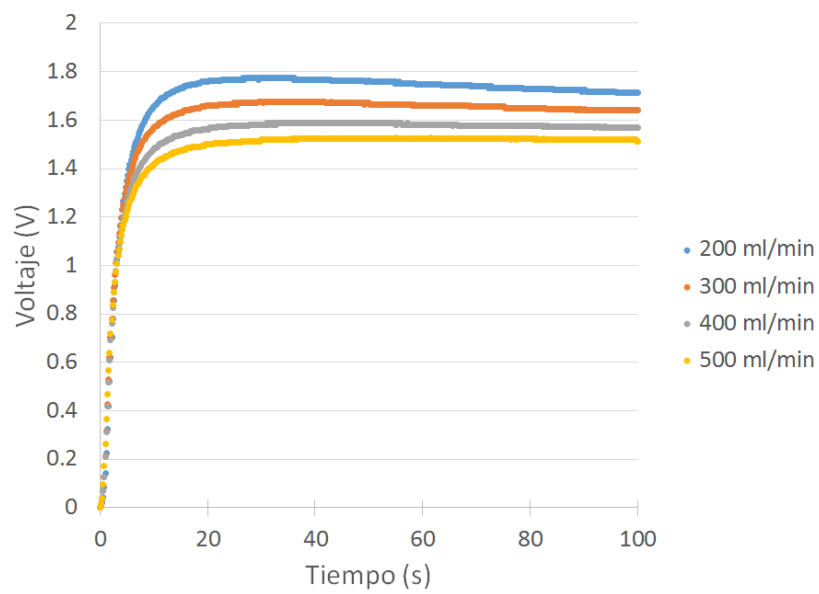


Figura 3.15. Respuesta obtenida a 25°C y 18%RH.

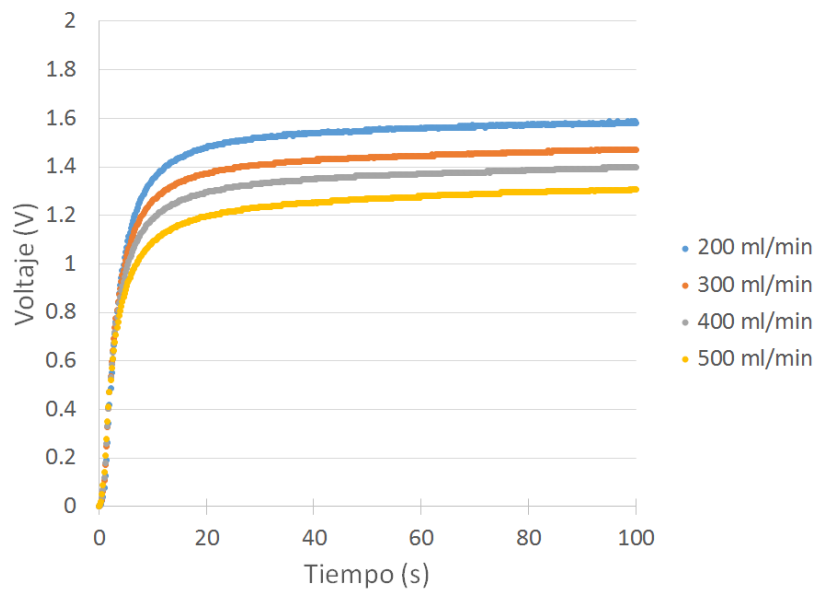


Figura 3.16. Respuesta obtenida a 27°C y 27%RH.

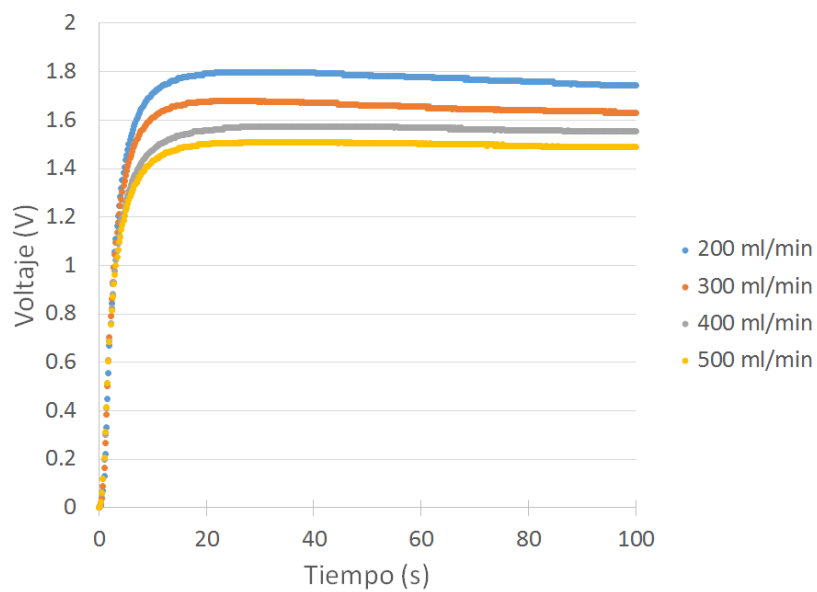


Figura 3.17. Respuesta obtenida a 28°C y 14%RH.

Capítulo 4

Análisis

4.1. Dependencia del Sensor TGS-2620 a la temperatura y humedad

Se realizó un ajuste del modelo del sensor TGS-2620 a partir de los datos proporcionados por el fabricante en su hoja de datos (Tabla 4.1) [41].

Tabla 4.1. Datos de la dependencia a la temperatura y humedad para los valores de R_s/R_0 en 300 ppm.

	35 %	50 %	65 %	96 %
-10				1.80
0			1.72	1.35
10		1.48	1.30	0.96
20	1.37	1.20	1.00	0.75
30	1.04	0.88	0.74	0.63
40	0.85	0.73	0.62	0.57

En la tabla 4.1 se muestran las proporciones de R_s/R_0 , donde R_s es la resistencia del sensor a diferentes condiciones ambientales y R_0 es la resistencia del sensor a 20 °C con 65 %RH en 300 ppm de concentración de etanol. Se realizó una gráfica en tres dimensiones a partir de los datos de la Tabla 4.1 como se muestra en la Figura 4.1.

También se aplicó un ajuste de regresión a los datos de la Tabla 4.1 obteniendo la ecuación 4.1

$$V = 3.09 - 0.027RH - 0.065T + 8.889 \times 10^{-5}RH^2 + 0.00026RH \cdot T + 0.00051T^2 \quad (4.1)$$

Se obtuvo un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9971$. Esta ecuación está representada en la gráfica de la Figura 4.2, en la que también se muestra la extrapolación

usando los valores del extremo de la Tabla 4.1.

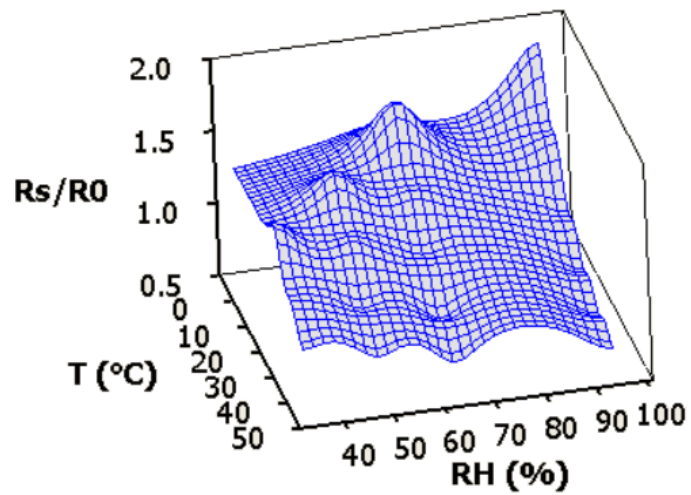


Figura 4.1. Representación gráfica de la dependencia a la temperatura y humedad relativa en tres dimensiones.

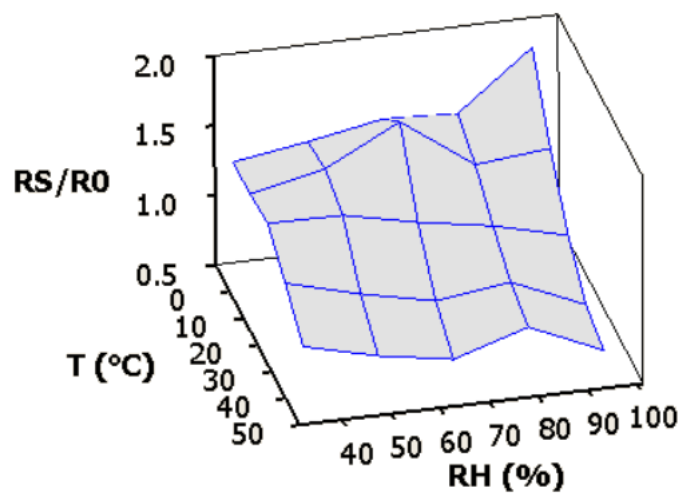


Figura 4.2. Ajuste de regresión hecho a partir de los datos proporcionados por el fabricante y su extrapolación.

4.2. Respuesta transitoria

Volvamos a la ecuación 1.19, esta nos dice que podemos conocer la respuesta en el estado estable si tenemos la constante de tiempo del sensor obtenida por medio de ajustes de regresión y la pendiente de la función del sistema de primer orden evaluada en cero. Un ejemplo del cálculo de la constante de tiempo se muestra en la Figura 4.3, en ella se puede ver que la línea obtenida del ajuste (azul) esta tapada por los puntos de los datos recibidos (rojo). Para seleccionar los puntos de la respuesta al estímulo del etanol que se usarán para el ajuste comenzamos con el último punto de la línea base, es decir, la respuesta constante sin presencia del estímulo y continuamos hasta el tiempo 100. Un buen cálculo del ajuste de regresión se obtiene con unas *SSE* (suma de cuadrados de error) y *S* (error estándar de la regresión) bajas. Se ha visto que los mejores ajustes se obtienen al no considerar al primero de los puntos seleccionados con las instrucciones anteriores, en otras palabras excluir todos los puntos de la línea base.

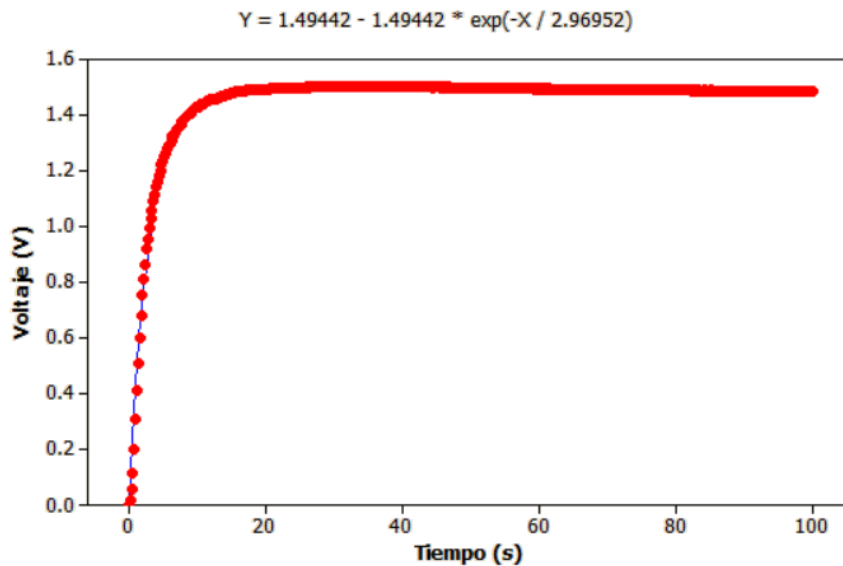


Figura 4.3. Ajuste de regresión para los datos obtenidos en 28°C con 14%RH y 500ml/min.

Como los datos adquiridos de las mediciones son discretos no podemos calcular las pendientes simplemente derivando una función. En el presente proyecto se probaron dos formas para calcular la pendiente: Ajustes de regresión de recta y la fórmula de la pendiente que se muestra en la ecuación 4.2

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4.2)$$

El objetivo es encontrar la pendiente que sea más parecida a la pendiente en la que supuestamente iniciaría la función del sistema de primer orden. Se hicieron varias

pruebas con ambos métodos usando diferentes puntos iniciales y distintas cantidades de puntos para los ajustes de regresión y puntos a diferentes distancias entre sí para el caso de la fórmula de la pendiente. Se observó que los mejores resultados se obtenían cuando los ajustes de recta se encontraban entre el quinto y el octavo punto o entre el sexto y el noveno al igual que en el uso de la fórmula de la pendiente (Figura 4.4). Tras revisar las predicciones obtenidas por ambos métodos el segundo obtuvo resultados más cercanos al valor medido.

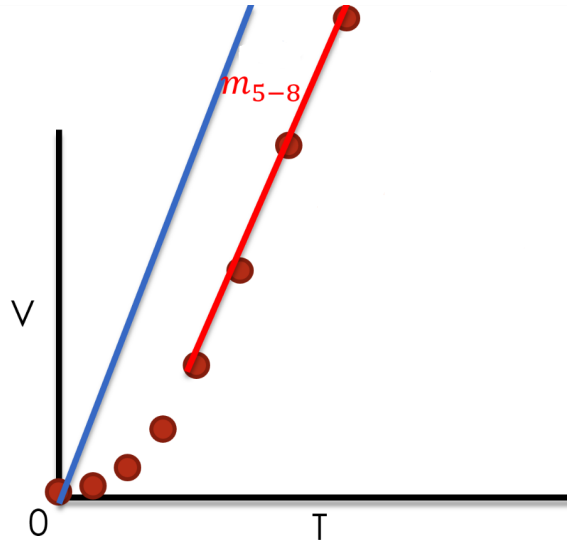


Figura 4.4. Método de la fórmula de la pendiente.

En la Figura 4.5 podemos ver el acercamiento al inicio de la respuesta transitoria de la Figura 3.15. En ella se muestra que cuanto más alta sea la velocidad del flujo del aire las pendientes al inicio tienen un mayor valor en comparación a las velocidades de flujo más lentas. De los puntos más cercanos al inicio sólo se pueden calcular pendientes poco pronunciadas por esta razón la mejor pendiente para calcular la respuesta en estado estable es la que se obtiene con los puntos 5 y 8 o 6 y 9, más adelante el valor de las pendientes calculadas vuelve a disminuir.

Con estas pendientes podemos cambiar la ecuación 1.19 por la forma de la ecuación 4.3

$$R_1 = \tau m \quad (4.3)$$

Calculando las respuestas en estado estable usando las primeras diez pendientes de los resultados obtenidos y obteniendo la proporción con las adquiridas en las mediciones se obtienen las Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9. Dentro de estas gráficas la línea verde representa el lugar en el que estarían los puntos en el caso de que el valor calculado sea igual al valor medido y el espacio entre las líneas horizontales rojas representa el

error del $\pm 5\%$.

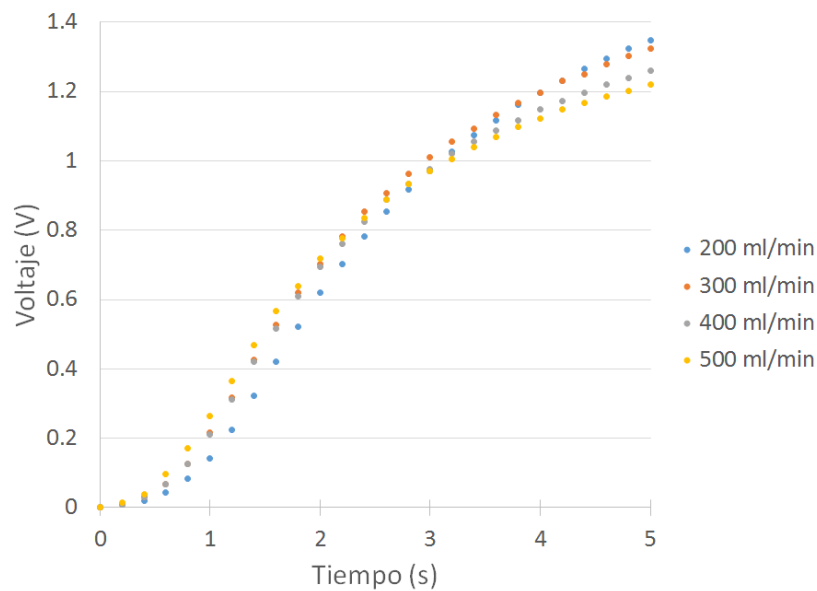


Figura 4.5. Acercamiento al inicio de la respuesta transitoria en las condiciones de 25°C con $18\%RH$.

Con excepción de los datos obtenidos del flujo de 200 ml/min que por tener la velocidad más lenta de las muestras no entra en las condiciones del patrón que se encuentra en el resto de velocidades de flujo, el cálculo de la respuesta en estado estable usando las pendientes 5-8 y 6-9 se acercan más al valor medido. Probablemente esto se deba porque a velocidades lentas en el momento al hacer el cambio en las válvulas de gas no se alcanza a formar el estímulo en escalón que se muestra en la Figura 1.4a.

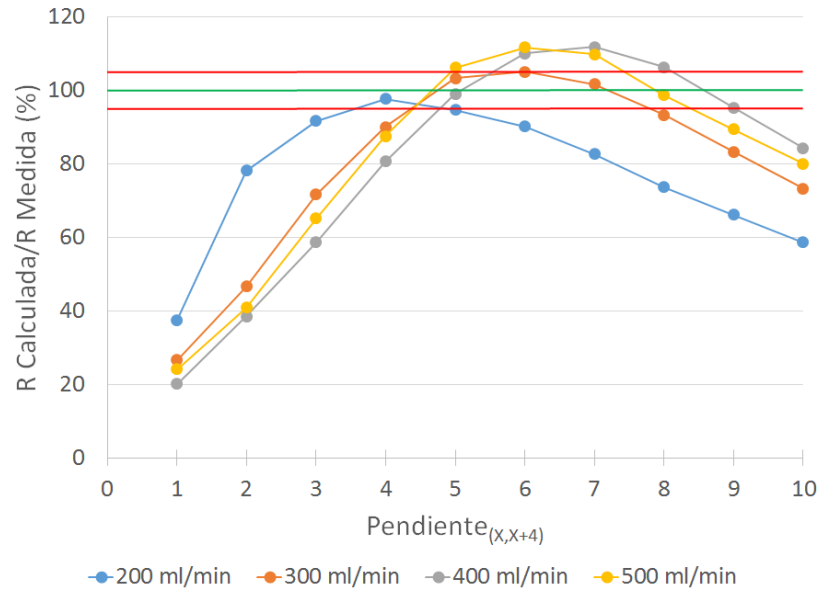


Figura 4.6. Comparación de las predicciones de 21°C con 21%RH.

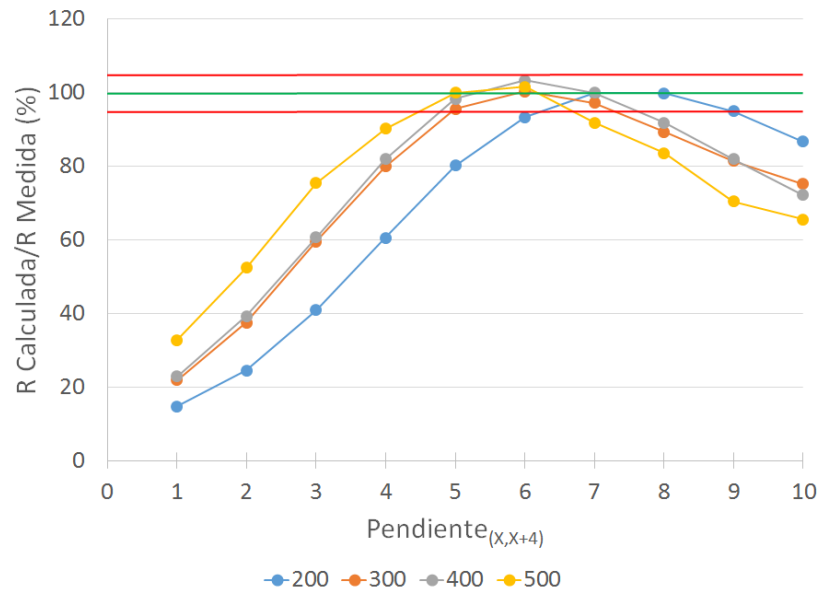


Figura 4.7. Comparación de las predicciones de 25°C con 18%RH.

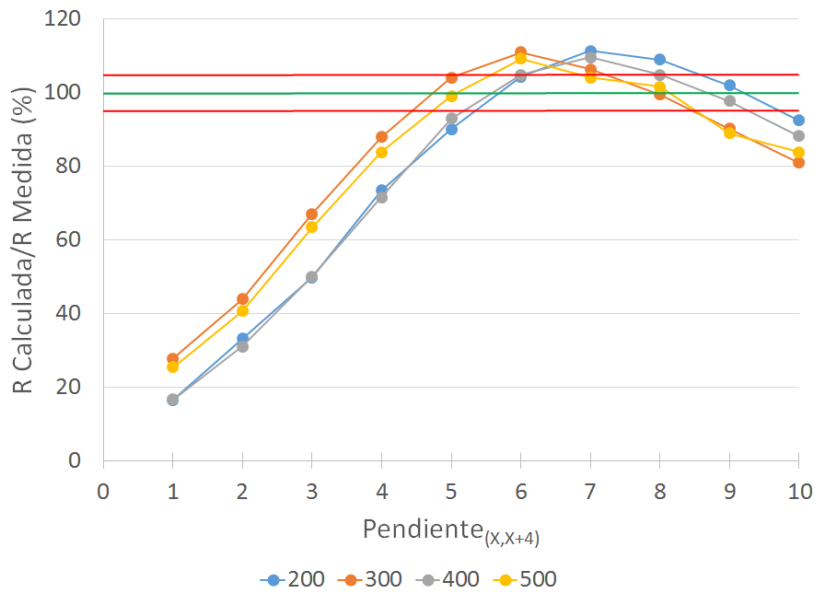


Figura 4.8. Comparación de las predicciones de 27°C con 27%RH.

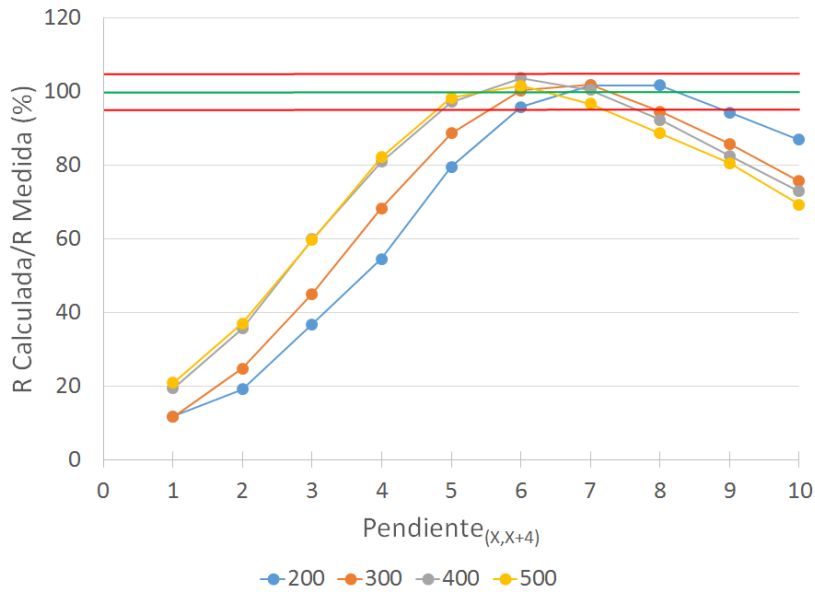
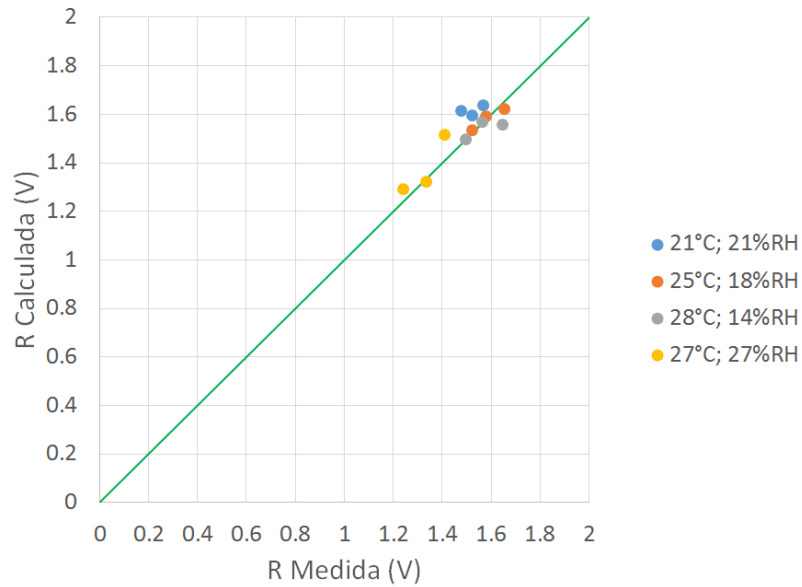
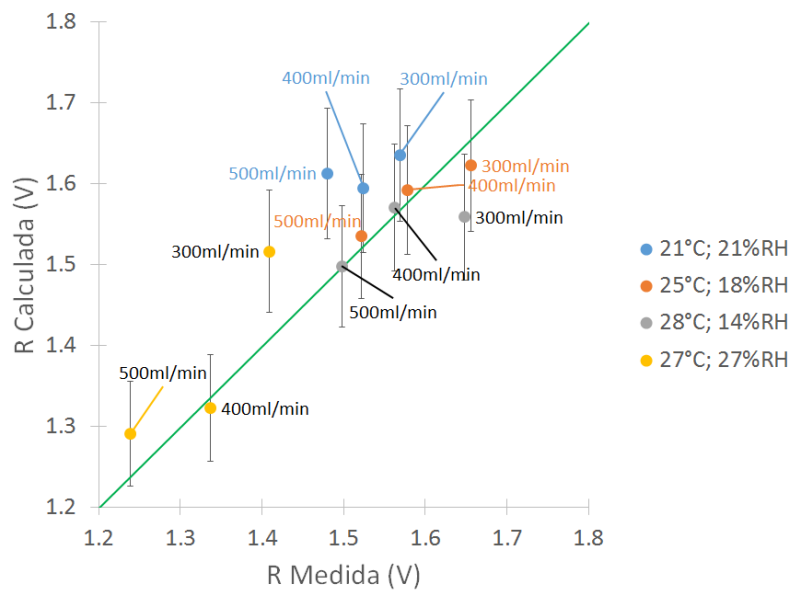


Figura 4.9. Comparación de las predicciones de 28°C con 14%RH.

Si calculamos los promedios de los cálculos obtenidos de las pendientes 5-8 y 6-9 y excluimos al flujo 200 ml/min podremos graficar la Figura 4.10a donde podemos ver la magnitud de la comparación de los datos. En la Figura 4.10b se encuentran los puntos de comparación con sus barras de porcentaje de error del 5 % incluidas. Podemos observar que la mayoría de las predicciones están en valores cercanos a los medidos.



(a)



(b)

Figura 4.10. Comparación entre el estado estable calculado y el medido, la línea verde representa el lugar en el que estarían los puntos en el caso de que el valor del estado estable calculado fuese igual al medido. a) Comparación tomando en imagen completa. b) Acercamiento a los datos.

Es importante mencionar que con excepción de las mediciones realizadas a 21

°C con 21 %RH las predicciones calculadas a 400 *ml/min* y 500 *ml/min* son las más acertadas de sus respectivos flujos. Posiblemente esto se deba al diseño del sistema dinámico y a las válvulas que influyen las respuestas del sensor en flujos lentos.

También se ha hecho la comparación entre los promedios de las constantes de tiempo obtenidas de las mediciones, estos datos se encuentran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Datos de las constantes de tiempo del sensor en diferentes condiciones de temperatura y humedad.

	27 °C; 27%RH	21 °C; 21%RH	25 °C; 18%RH	28 °C; 14%RH
300 ml/min	4.01	3.22	3.19	2.95
400 ml/min	3.92	3.44	3.18	3.11
500 ml/min	3.87	3.39	3.07	2.97
Promedio	3.93	3.35	3.15	3.01
Desviación estándar	0.06	0.10	0.06	0.07

Si comparamos la proporción del tiempo de predicción (2 s) con el tiempo en el que la respuesta en estado estable empieza (5 τ) obtenemos los porcentaje mostrados en la tabla 4.2. En ella podemos ver que el tiempo de predicción es entre un 10 % y 20 % más rápida que la estabilización.

Tabla 4.3. Porcentajes de la comparación del tiempo de predicción con el tiempo de estabilización.

	27 °C; 27%RH	21 °C; 21%RH	25 °C; 18%RH	28 °C; 14%RH
300 ml/min	10.0	12.4	12.5	13.6
400 ml/min	10.2	11.6	12.6	12.9
500 ml/min	10.3	11.8	13.0	13.5
Promedio	10.2	11.9	12.7	13.3

En la Figura 4.11 se muestran las constantes de tiempo del sensor TGS-2620 obtenidas por medio de ajustes de regresión. Los datos obtenidos a las condiciones de 21 °C con 21 %RH, 25 °C con 18 %RH y 28 °C con 14 %RH se midieron con un filtro de humedad diferente a las mediciones obtenidas con 27 °C y 27 %RH. Esto significa que tenemos humedades absolutas diferentes, en el primer caso de 0.004 kg/m^3 y en el segundo caso de 0.007 kg/m^3 . En la gráfica se puede observar que parece haber una similitud de los valores de las constantes de tiempo de las primeras tres condiciones ambientales que a su vez parecen diferir de la cuarta. Para comprobar esto se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de comparar las medias y determinar si estas difieren (hipótesis nula). Consideraremos que si hay una diferencia de 2 s para alcanzar el estado estable en las mediciones la hipótesis nula

se cumple. Esto implicaría tener una diferencia en las constantes de tiempo de 0.4 s.

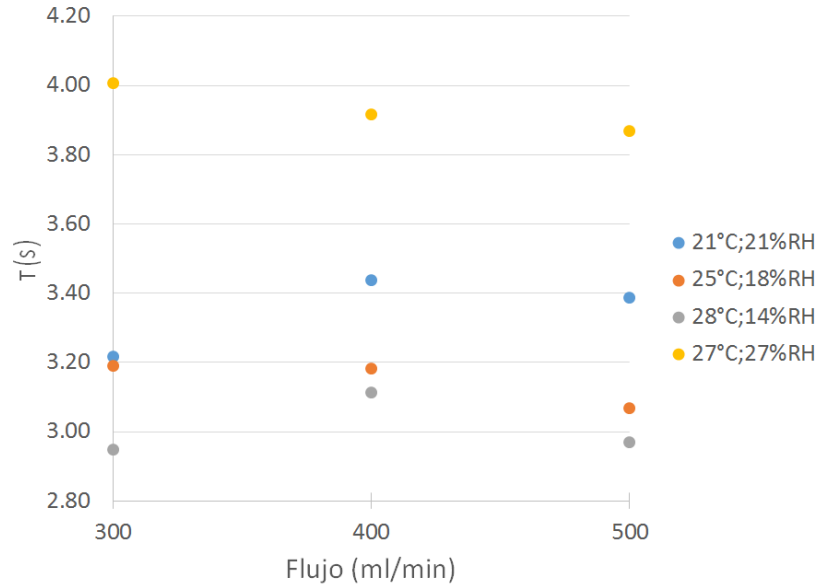
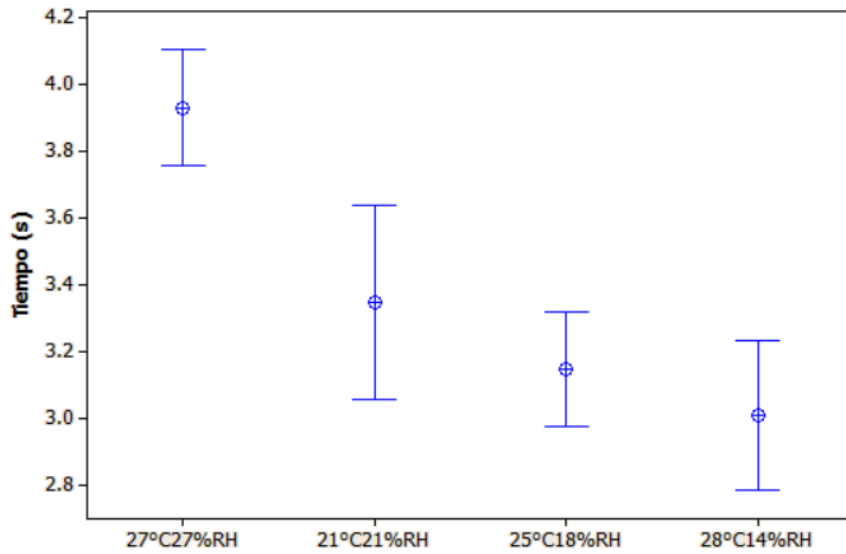


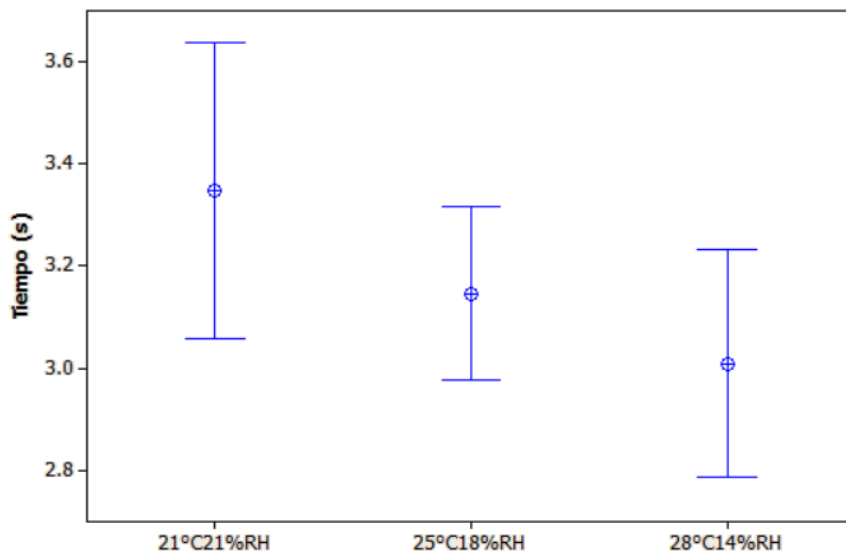
Figura 4.11. Constantes de tiempo del sensor TGS-2620.

En la Figura 4.12 se observan las medias de las constantes de tiempo para cada condición ambiental y sus respectivos intervalos de confianza del 95%. En el ANOVA realizado con los datos de la Figura 4.12a se obtuvo un nivel de significancia de $P = 0.000$ que al ser menor que 0.05 se acepta la hipótesis nula, es decir, hay al menos una media diferente a las demás, esto se observa fácilmente en la gráfica porque el intervalo de 27 °C con 27 %RH no se superpone a cualquiera de los intervalos de las otras medias. En el caso del ANOVA de la Figura 4.12b se obtuvo un nivel de significancia de $P = 0.055$ que al ser mayor que 0.05 nos indica que las diferencias entre las medias no son significativas, esto puede observarse en la superposición de los intervalos de confianza de las mediciones realizadas con el mismo filtro de humedad.

Con estos resultados podemos concluir que las constantes de tiempo del sensor tienen valores similares si tenemos la misma humedad absoluta (el vapor de agua diluido en el aire por volumen) en el ambiente sin importar la temperatura en el rango comprendido entre los 21 °C y 28 °C. Esto es importante ya que nos permite conocer la constante de tiempo del sensor para el etanol a esas condiciones, si se encontraran valores diferentes probablemente se debería a la presencia de otro compuesto en el ambiente.



(a)



(b)

Figura 4.12. Gráficas de intervalos para a) el análisis de varianza entre las 4 condiciones ambientales y b) el análisis de varianza de las 3 condiciones ambientales que usan el mismo filtro de humedad.

Conclusiones

Se programó el PIC16F877A para aprovechar sus componentes integrados como el conversor analógico digital y la comunicación serial asíncrona.

Se realizó un programa en LabView para guardar los datos recibidos del microcontrolador incluyendo una interfaz gráfica que permitiera al usuario configurar el modo en el que las mediciones se lleven a cabo.

Se encontró que al disminuir el valor de la humedad relativa, el estado estable del filtro de humedad se alcanza en un tiempo no mayor a 26 s. Por medio de ajustes de regresión se obtuvo este resultado.

Se buscaron varias causas de ruido electrónico y se tomaron las precauciones para evitarlo como seleccionar cuidadosamente las fuentes y reguladores que se conectarán al circuito de los sensores además de conectar filtros con capacitores.

Se realizaron mediciones sobre la respuesta dinámica del sensor TGS-2620 para comparar los resultados entre las condiciones de humedad ambiente y las dadas por un filtro de humedad. Se mostró que era menos probable obtener una respuesta de un sistema de segundo orden en un ambiente de baja humedad relativa.

Se descubrió un método de predicción de la respuesta en estado estable del sensor TGS-2620 a partir de los datos obtenidos en los primeros 2 s de la respuesta transitoria, siendo capaces de obtener cálculos con un error menor al 5 % del valor medido. Esta predicción se obtiene en un tiempo 10 o 13 % menor al del lapso en el que el estado estable se presenta

Las constantes de tiempo del sensor fueron comparadas, estas se calcularon por medio de ajustes de regresión de la respuesta del sensor TGS-2620. Se observó que dependen de la humedad absoluta, es decir, la cantidad de vapor de agua por volumen. Por esa razón al trabajar con la misma humedad absoluta obtenemos valores similares de la constante de tiempo del sensor, sin importar el cambio de la temperatura y la humedad relativa. Por lo que la humedad absoluta será un factor a tomar en cuenta al realizar futuras mediciones.

Trabajo a futuro

Realizar más mediciones en distintos valores de humedad absoluta y a velocidades de flujo rápidas, de 400 *ml/min* a 500 *ml/min*. Ya que estas parecen experimentar una menor influencia de las características del diseño de sistema dinámico. También al sospechar sobre el envejecimiento del sensor estas nuevas mediciones se harían con uno nuevo.

Realizar mediciones con otros compuestos volátiles orgánicos y con diferentes sensores de la serie TGS que estén dedicados a estos nuevos compuestos para verificar si el método de predicción del estado estable puede implementarse en ellos.

Calcular el promedio exponencial móvil (ema) en las mediciones que se hagan posteriormente. Buscando si este modelo puede apoyar a la robustez del método de predicción del estado estable.

Implementar un sistema de control de humedad que pueda configurarse para tener una salida constante de varios valores de humedad.

Bibliografía

- [1] Michael Meredith. Neural circuit computation: complex patterns in the olfactory bulb. *Brain research bulletin*, 29(1):111–117, 1992.
- [2] RW Moncrieff. An instrument for measuring and classifying odors. *Journal of applied physiology*, 16(4):742–749, 1961.
- [3] Walter F Wilkens and John D Hartman. An electronic analog for the olfactory processes. *Journal of Food Science*, 29(3):372–378, 1964.
- [4] Krishna Persaud and George Dodd. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose. 1982.
- [5] Julian W Gardner and Philip Nigel Bartlett. *Sensors and sensory systems for an electronic nose*, volume 212. Springer, 1992.
- [6] A Fort, M Gregorkiewitz, N Machetti, S Rocchi, B Serrano, L Tondi, N Olivieri, V Vignoli, G Faglia, and E Comini. Selectivity enhancement of sno 2 sensors by means of operating temperature modulation. *Thin Solid Films*, 418(1):2–8, 2002.
- [7] Zhe Zhang, Jin Tong, Dong-hui Chen, and Yu-bin Lan. Electronic nose with an air sensor matrix for detecting beef freshness. *Journal of Bionic Engineering*, 5(1):67–73, 2008.
- [8] A Fort, S Rocchi, MB Serrano-Santos, M Mugnaini, V Vignoli, A Atrei, and R Spinicci. Co sensing with sno 2-based thick film sensors: Surface state model for conductance responses during thermal-modulation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 116(1):43–48, 2006.
- [9] Marco Trincavelli, Silvia Coradeschi, and Amy Loutfi. Classification of odours with mobile robots based on transient response. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4110–4115. IEEE, 2008.
- [10] Yuta Wada, Marco Trincavelli, Yuichiro Fukazawa, and Hiroshi Ishida. Collecting a database for studying gas distribution mapping and gas source localization with mobile robots. In *The... international conference on advanced me-*

- chatronics: toward evolutionary fusion of IT and mechatronics: ICAM: abstracts*, volume 2010, pages 183–188, 2010.
- [11] Ata Jahangir Moshayedi and Damayanti Gharpure. Implementing breath to improve response of gas sensors for leak detection in plume tracker robots. In *Proceedings of the Third International Conference on Soft Computing for Problem Solving*, pages 337–348. Springer, 2014.
- [12] Jorge E Sánchez. *Sistema Autónomo Localizador de Fuentes de Gas*. 2014.
- [13] Chen Liwei, Yang Jianhua, and Hafid Oussaadi. Experimental study on odor source localization system based on metal oxide gas sensors. In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on*, volume 3, pages 1–4. IEEE, 2011.
- [14] Mohammed Zahid, Tanishqua Bhute, Manisha D Shirke, and DC Gharpure. Development of odor compass: Source direction detection system. In *Physics and Technology of Sensors (ISPTS), 2015 2nd International Symposium on*, pages 138–141. IEEE, 2015.
- [15] Severino Muñoz, Takamichi Nakamoto, and Toyosaka Moriizumi. Study of transient response of qcm odor/gas sensors coated with calixarene lb films. *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, 119(8-9):430–435, 1999.
- [16] Ricardo Gutierrez-Osuna, H Troy Nagle, and Susan S Schiffman. Transient response analysis of an electronic nose using multi-exponential models. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 61(1):170–182, 1999.
- [17] R Gutierrez-Osuna, A Gutierrez-Galvez, and N Powar. Transient response analysis for temperature-modulated chemoresistors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 93(1):57–66, 2003.
- [18] Jordi Fonollosa, Sadique Sheik, Ramón Huerta, and Santiago Marco. Reservoir computing compensates slow response of chemosensor arrays exposed to fast varying gas concentrations in continuous monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 215:618–629, 2015.
- [19] Mehmet K Muezzinoglu, Alexander Vergara, Ramon Huerta, Nikolai Rulkov, Mikhail I Rabinovich, Al Selverston, and Henry DI Abarbanel. Acceleration of chemo-sensory information processing using transient features. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 137(2):507–512, 2009.
- [20] Maryam Siadat, Etienne Losson, Diaa Ahmadou, and Martine Lumbreras. Detection optimization using a transient feature from a metal oxide gas sensor array. *Sensors & Transducers*, 27(5):340, 2014.
- [21] VÍCTOR HERNANDEZ BENNETTS. Fast transient classification with a parallelized temperature modulated e-nose, 2010.

- [22] Diana L Osorio. *Estudio de la respuesta transitoria de sensores de gas a base de resonadores de cuarzo*. 2013.
- [23] Stefan Vaihinger, Wolfgang Göpel, and Joseph R Stetter. Detection of halogenated and other hydrocarbons in air: Response functions of catalyst/electrochemical sensor systems. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 4:337–343, 2001.
- [24] Tomas Eklöv, Per Mårtensson, and Ingemar Lundström. Enhanced selectivity of mosfet gas sensors by systematical analysis of transient parameters. *Analytica Chimica Acta*, 353(2-3):291–300, 1997.
- [25] Mark G Lawrence. The relationship between relative humidity and the dew-point temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2):225–233, 2005.
- [26] Li Yang, Rongwei Zhang, Daniela Staiculescu, CP Wong, and Manos 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*, 8:653–656, 2009.
- [27] Fengchun Tian, Simon X Yang, and Kevin Dong. Circuit and noise analysis of odorant gas sensors in an e-nose. *Sensors*, 5(1):85–96, 2005.
- [28] Luay Fraiwan, Khaldon Lweesy, Aya Bani-Salma, and Nour Mani. A wireless home safety gas leakage detection system. In *Biomedical Engineering (MECBME), 2011 1st Middle East Conference on*, pages 11–14. IEEE, 2011.
- [29] Johan Siden, Xuezhi Zeng, Tomas Unander, Andrey Koptuyug, and Hans-Erik Nilsson. Remote moisture sensing utilizing ordinary rfid tags. In *Sensors, 2007 IEEE*, pages 308–311. IEEE, 2007.
- [30] George F Fine, Leon M Cavanagh, Ayo Afonja, and Russell Binions. Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*, 10(6):5469–5502, 2010.
- [31] Xiao Liu, Sitian Cheng, Hong Liu, Sha Hu, Daqiang Zhang, and Huansheng Ning. A survey on gas sensing technology. *Sensors*, 12(7):9635–9665, 2012.
- [32] G Korotcenkov and BK Cho. Instability of metal oxide-based conductometric gas sensors and approaches to stability improvement (short survey). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 156(2):527–538, 2011.
- [33] Beth C Munoz, Gregory Steinthal, and Steven Sunshine. Conductive polymer-carbon black composites-based sensor arrays for use in an electronic nose. *Sensor Review*, 19(4):300–305, 1999.

- [34] Laisheng Tong, Guangning Wu, Jinlu Sheng, Jun Zhang, and Lijun Zhou. Oil-gas separation mechanism of polymer membranes applied to online transformer dissolved gases monitoring. In *Electrical Insulation, 2004. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on*, pages 97–100. IEEE, 2004.
- [35] Hiroaki Miya, Tatsuo Shiina, Takaaki Kato, Kazuo Noguchi, Testuo Fukuchi, Ippei Asahi, Sachiyo Sugimoto, Hideki Ninomiya, and Yuzo Shimamoto. Compact raman lidar for hydrogen gas leak detection. In *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, page ME1_3. Optical Society of America, 2009.
- [36] Ki-Hyun Kim. Performance characterization of the gc/pfpd for h₂s, ch₃sh, dms, and dmcs in air. *Atmospheric Environment*, 39(12):2235–2242, 2005.
- [37] Antti J Niskanen, Aapo Varpula, Mikko Utriainen, Gomathi Natarajan, David C Cameron, Sergey Novikov, Veli-Matti Airaksinen, Juha Sinkkonen, and Sami Franssila. Atomic layer deposition of tin dioxide sensing film in microhotplate gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 148(1):227–232, 2010.
- [38] Kwan Ting Ng, Farid Boussaid, and Amine Bermak. A cmos single-chip gas recognition circuit for metal oxide gas sensor arrays. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 58(7):1569–1580, 2011.
- [39] Wen Zeng, Tianmo Liu, Zhongchang Wang, Susumu Tsukimoto, Mitsuhiro Saito, and Yuichi Ikuhara. Selective detection of formaldehyde gas using a cd-doped tio₂-sno₂ sensor. *Sensors*, 9(11):9029–9038, 2009.
- [40] Figaro. General information for tgs sensors. Accessed: 2017-04-30.
- [41] Figaro. Technical information for tgs2620. Accessed: 2017-04-30.
- [42] Jose L Solis, Gary E Seeton, Yingfeng Li, and Laszlo B Kish. Fluctuation-enhanced multiple-gas sensing by commercial taguchi sensors. *IEEE Sensors Journal*, 5(6):1338–1345, 2005.
- [43] J M Angulo and I Angulo. *Microcontroladores PIC Diseño practico de aplicaciones*. McGraw-Hill, 2005.
- [44] Microchip. Pic16f87xa data sheet. Accessed: 2017-04-30.
- [45] Texas Instruments. Max232x dual eia-232 drivers/receivers. Accessed: 2017-04-30.
- [46] Honeywell. Hih-4030/31 series humidity sensors. Accessed: 2017-04-30.
- [47] Texas Instruments. Lm35 precision centigrade temperature sensors. Accessed: 2017-05-1.
- [48] Aosong. Temperature and humidity module am2302 product manual. Accessed: 2017-05-4.

- [49] Apolonio Ata. Descripción de la tarjeta pic40. Accessed: 2017-05-22.
- [50] Prolific. PI-2303hx edition (chip rev d) usb to serial bridge controller product datasheet. Accessed: 2017-05-16.
- [51] ITead Studio. Hc-05 bluetooth to serial port module. Accessed: 2017-05-5.
- [52] Wavetek. Wavetek meterman operator's manual model 23xt,25xt,27xt,28xt digital multimeter. Accessed: 2017-05-1.
- [53] Aalborg. Operating manual gfc mass flow controller. Accessed: 2017-05-1.
- [54] Thermo Scientific. Thermo scientific neslab rte series refrigerated bath installation operation basic maintenance. Accessed: 2017-05-1.
- [55] J W Gardner and P N Bartlett. *Electronic Noses, Principles and Applications*. Oxford Science publication, 1999.
- [56] David Silva. *Estudio de la respuesta transitoria del sensor de estado sólido TGS-2620*. 2015.
- [57] Liwei Chen, Jianhua Yang, and Bo Cui. Experimental study on odor compass system based on metal oxide gas sensors [j]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 11:004, 2010.