



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

SISTEMA AUTÓNOMO LOCALIZADOR DE  
FUENTES DE GAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
MAESTRÍA EN CIENCIAS *FÍSICA APLICADA*

PRESENTA:  
SÁNCHEZ SOSA JORGE EDWIN

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. MUÑOZ AGUIRRE SEVERINO

Diciembre 2014



SISTEMA AUTÓNOMO LOCALIZADOR DE FUENTES DE GAS

---

---

SÁNCHEZ SOSA JORGE EDWIN

COMITÉ

---

Dra. Beltrán Pérez Georgina  
Presidente

---

Dr. Castillo Mixcoatl Juan  
Secretario

---

Dr. Meneses Fabián Cruz  
Vocal

---

Dr. Muñoz Mata José Lorenzo  
Suplente

---

Dr. Muñoz Aguirre Severino  
Asesor



*A mi mamá, quien ha sido la única persona que ha confiado en mí desde el principio de mis días, en reconocimiento a su esfuerzo.*

*A mis dos hermanos, quienes sin saber una pizca del contenido de este trabajo han sido parte irremplazable del mismo.*

*A mis tres brillantes estrellitas, quienes siempre han buscado mi compañía sin importarles qué he sido o qué seré, sino lo que soy ahora.*



## Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivo Específicos	4
Referencias	5
<b>2. Sensor de gas</b>	<b>7</b>
2.1. Sensores MOS	7
2.2. Sensor TGS 2620	10
2.2.1. Estructura del TGS 2620	10
2.2.2. Respuesta	11
2.2.3. Características eléctricas	12
2.2.4. Acondicionador de salida	14
2.2.5. Resistencia de carga $R_L$	16
Referencias	18
<b>3. Caracterización del TGS 2620</b>	<b>19</b>
3.1. La caracterización es necesaria	19
3.2. En busca de $K$ y de $\alpha$	21
3.3. De microlitros a partes por millón	21
3.3.1. Factor de Compresibilidad	22
3.3.2. Ecuación de Concentración	23
3.3.3. Factor de Conversión	25
3.4. Inyecciones	26
3.5. Ecuación característica	29
3.6. Concentración a partir del voltaje medido	30

Referencias . . . . .	32
<b>4. Sistema Localizador</b>	<b>35</b>
4.1. Olfato electrónico . . . . .	35
4.2. Sensores Implementados . . . . .	36
4.3. Microcontrolador y Lenguaje de Programación . . . . .	38
4.3.1. Microcontrolador . . . . .	38
4.3.1.1. Memorias del PIC: de programa y de datos . . . . .	38
4.3.1.2. Instrucciones máquina, Ciclo de reloj, MIPS . . . . .	40
4.3.2. Lenguaje de Programación . . . . .	42
4.4. Elementos del Olfato Eléctronico . . . . .	45
4.4.1. Consola . . . . .	45
4.4.2. Nariz . . . . .	48
4.5. Localización de Fugas de Gas . . . . .	50
4.5.1. Algoritmo Localizador de Fugas . . . . .	53
Referencias . . . . .	56
<b>5. Aspectos Finales</b>	<b>57</b>
5.1. Experiencias . . . . .	57
5.2. Resultados . . . . .	59
5.3. Conclusiones . . . . .	64
5.4. Presentaciones y Productos . . . . .	65
Referencias . . . . .	65
<b>A. Registros de la Plataforma</b>	<b>59</b>

## Índice de figuras

2.1. Reacciones redox . . . . .	9
2.2. Estructura del sensor . . . . .	11
2.3. Sensor <i>Figaro</i> . . . . .	11
2.4. Respuesta del sensor y su repetibilidad. . . . .	12
2.5. Comparación de respuestas: estática-cinética . . . . .	13
2.6. Acondicionador de salida . . . . .	14
2.7. Divisor de voltaje . . . . .	15
2.8. Consumo de energía . . . . .	16
2.9. Relación entre $R_S/R_L$ y $V_L/V_C$ . . . . .	17
2.10. Ejemplo para determinar $R_L$ . . . . .	17
3.1. Respuesta del sesor TGS 2620 . . . . .	20
3.2. Baño térmico . . . . .	28
3.3. Curva característica del sensor . . . . .	30
3.4. Curvas del sensor $C = C(V_L)$ y $V_L = V_L(C)$ . . . . .	31
4.1. Diagrama de bloques . . . . .	36
4.2. Diagrama de tiempos del SRF05 . . . . .	37
4.3. Sensor ultrasónico SRF05 . . . . .	38
4.4. Arquitecturas . . . . .	39
4.5. Módulos del Sistema Localizador . . . . .	45
4.6. Esquema electrónico del módulo Olfato . . . . .	47
4.7. Consola de operación . . . . .	48
4.8. Elementos de la Nariz . . . . .	49
4.9. Sistema completo . . . . .	50
4.10. Tres modos de operación . . . . .	51
4.11. Gráficas de la función discreta $V_L = V_L(t)$ . . . . .	52
4.12. Función $Giro(n^\circ)$ . . . . .	55
4.13. Ejemplo de lecturas iniciales . . . . .	55
4.14. Posible trayectoria del sistema definida según el Algoritmo de Localización. . . . .	55
5.1. Dimensiones de la habitación . . . . .	58
5.2. Fuente de gas . . . . .	59

5.3. Colecta de datos . . . . .	59
5.4. Respuesta del sensor con y sin cubierta . . . . .	60
5.5. Inicio del sensor TGS . . . . .	61
5.6. Cuatro posiciones . . . . .	61
5.7. Respuesta del sensor rotando . . . . .	62
5.8. Respuesta del sensor en plena localización . . . . .	63
A.1. Movimientos posibles . . . . .	60

## Índice de tablas

2.1. Sensores <i>Figaro</i> . . . . .	10
2.2. Especificaciones del sensor . . . . .	14
3.1. Mediciones de $V_L$ . . . . .	27
4.1. Microcontroladores PIC . . . . .	40



*¿Alguna vez habéis medido un olor? ¿Podéis decir si un olor es justo el doble de fuerte que otro? ¿Podéis medir la diferencia entre un tipo de olor y otro? Es obvio que existen muchos diferentes tipos de olores... toda la gama existente entre el olor de las violetas hasta el olor de la asafétida. Pero hasta que no podáis medir el gusto de un olor y sus diferencias, no tendréis ciencia del olor. Si tenéis la ilusión de encontrar una nueva ciencia: medid un olor.*

–Alexander Graham Bell, 1914.

**E**STE trabajo final tiene su origen en algunas necesidades del Cuerpo Académico de Optoelectrónica y Fotónica (CAOyF) perteneciente a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM) de la Universidad Autónoma de Puebla (UAP). Un objetivo dentro de este Cuerpo es desarrollar robots capaces de localizar fugas de gas, sin embargo, como se comprenderá, diseñar y construir un robot con estas características no es sencillo pues diversas áreas multidisciplinarias salen a relucir.

## 1.1. Antecedentes

Desde sus orígenes el hombre ha utilizado su sentido del olfato para diagnosticar enfermedades, comprobar el estado de los alimentos o identificar peligros. Con el desarrollo científico-técnico y debido a la necesidad de realizar estas medidas en ambientes nocivos, de difícil acceso o para obtener resultados más precisos y rápidos, se han desarrollado instrumentos que sustituyen o apoyan al hombre en estas tareas.

Actualmente, se reportan diferentes tipos de sistemas o medios para mediciones de gases y vapores, que van desde los cromatógrafos gaseosos hasta métodos que emplean la propia nariz humana. De forma particular en la enología<sup>1</sup>, Busto [1] hace notar que el aroma de los alimentos se ha analizado tradicionalmente empleando técnicas de análisis sensorial y/o técnicas cromatográficas con sistemas de detección universal como la espectrometría de masas (técnica parcialmente destructiva) o la ionización de llama (técnica destructiva), y agrega que las técnicas cromatográficas son las que han permitido cuantificar los componentes individualizados que constituyen la fracción volátil del alimento.

La «Nariz Electrónica» u «Olfato Electrónico» se define como un instrumento dotado de sensores químicos y de un programa quimiométrico de reconocimiento de modelos, que es capaz de reconocer y comparar olores individuales o complejos [1]. La diferencia fundamental entre los sistemas de olfato electrónico reside en la tipología de los sensores empleados. Los llamados «sensores de gases» son los más consolidados principalmente por su relativa simpleza en funcionamiento y porque no requieren equipo ni personal especializado. Estos sensores, que funcionan generalmente en batería están constituidos por diferentes materiales que modifican sus propiedades cuando interaccionan con los compuestos volátiles, proporcionando una «huella olfativa» de la fracción volátil que han percibido. Chen [2], además de hacer patente el uso de la Nariz Electrónica en medicina, proporciona información extensa acerca de los tipos de sensores según los materiales que permiten su funcionamiento: semiconductores de óxido de metal, polímeros conductores (CP), ópticos, microbalanza de cristal de cuarzo (QCM), superficie de onda acústica (SAW), nanotubos de carbón y métodos calorimétricos; haciendo una comparación de costos, beneficios y desventajas.

En la nariz del humano las exposiciones prolongadas a ciertos productos químicos como los insecticidas y solventes pueden provocar cambios en la percepción de los olores o pérdida en la capacidad de oler, lo que conlleva a desarrollar un tipo de anosmia<sup>2</sup> implicando una disminución o pérdida total del sentido del olfato. Existe otro término llamado «fatiga olfativa», también conocido como «adaptación olfativa», el cual designa la incapacidad temporal para distinguir un olor particular, después de una exposición prolongada a dicho odorante. Por ejemplo, al entrar en un restaurante inicialmente el olor de los alimentos a menudo se percibe como muy fuerte, pero después de cierto tiempo el olor normalmente se desvanece hasta el punto donde el olor no es perceptible o es mucho más débil. Después de salir de la zona de alta concentración de olor, la sensibilidad se restablece con el tiempo. Para evitar esto, evaluadores de perfume a menudo tienen contenedores de granos de café, que tienden a «reiniciar» el olfato. La

---

<sup>1</sup>Ciencia, técnica y arte de producir vino.

<sup>2</sup>Pérdida del olfato. Suele ocurrir por trastornos químicos y, generalmente, por traumatismos craneales.

---

fatiga olfativa es un ejemplo de adaptación sensorial: el cuerpo se vuelve insensible a los estímulos para evitar la sobrecarga de nuestro sistema nervioso, lo que le permite responder a los nuevos estímulos que están fuera de lo común. Pero lo que se supone una ventaja es un peligro cuando la seguridad está en función del reconocimiento en los tipos de odorantes. Por ello existe la necesidad de crear un Olfato Electrónico capaz de detectar incansablemente fugas de gases tóxicos sin arriesgar la salud o integridad de los seres vivos. Desde un punto de vista masivo es importante también la correcta discriminación de gases nocivos, que si bien no son mortales sí representan gran incomodidad con apreciables consecuencias; en este sentido se observa que los malos olores que se generan en las ciudades provocan malestares dentro de la población: dolores de cabeza, molestias respiratorias y alteraciones psicológicas [3].

## 1.2. Justificación

La capacidad para determinar una fuga de gas es útil para robots móviles por varias razones. La primera y más evidente, es la detección y ubicación de fugas de gases peligrosos para el ser humano. Por extensión, este tipo de robots también se notarán útiles para actividades donde no sea menester la ubicación de la fuga, sino la pronta detección del gas, por ejemplo en un incendio en su etapa inicial. Una segunda razón, es el gran potencial de uso que tendrían este tipo de robots localizadores en misiones de rescate y seguridad, incluso también si el problema completo de localización de la fuente de gas no pueda llevarse a cabo usando solamente medios olfativos (debido a una baja concentración en sitios distantes de la fuente, por ejemplo). Un robot de rescate podría determinar si una víctima está viva evaluando si esa persona es una fuente de dióxido de carbono. Mientras que en escenarios de rescate también se utilizan otras modalidades de sensores para detectar signos vitales como en los robots de rescate estudiados por Casper y Murphy [4], un robot móvil que esté equipado con sensores de gas sería además capaz de monitorear el aire posiblemente contaminado en un sitio de emergencia; de este modo, el robot puede evitar que los trabajadores de rescate puedan ser heridos debido a explosiones, asfixia o intoxicación. Por otra parte, un robot de rescate podría armar un mapa de la distribución de gas espacial tal como lo hace el robot de Lilienthal y Zell [5], proporcionando al equipo de rescate información para apoyar la toma de decisiones.

Este robot de Lilienthal y Zell (2001) debe su movilidad al sistema robótico móvil ATRV-JR con un costo en 2002 de 23,950 dólares según su fabricante *iRobot*, y su parte sensitiva a un arreglo de sensores de óxido de metal con matrícula TGS 2620; con este arreglo se reporta la distribución espacial de la concentración de una fuga radial de gas por evaporación de etanol en un área de 5×12 metros mediante una trayectoria definida en espiral. Trincavelli *et al.* [6] (2008) emplea en la parte sensitiva nuevamente diversos sensores de óxido de metal bajo la serie TGS y además utiliza el mismo sistema para la

movilidad, el ATRV-JR, junto con el anemómetro ultrasónico Young 81000 con un costo en la actualidad de 2,668 dólares que es capaz de medir velocidades del viento desde 0 m/s a 40 m/s con una resolución de 0.01 m/s; especificaciones necesarias para medir la velocidad de la traza de etanol en el flujo de aire dentro de una habitación en calma ( $\sim 0.06$  m/s). Gonzalez *et al.* [7] (2011) recurre a gran número de sensores TGS 2620 para obtener lecturas sin el largo tiempo de recuperación que caracteriza a los sensores de óxido de metal; su robot debe su movilidad a la plataforma robótica PATROLBOT de alrededor de 30,000 dólares. Es claro que en este tipo de trabajos no se repara en costos; por su parte, Song *et al.* [8] (2011) presenta un colectivo de tres robots localizadores de fugas basado en tres TGS 2620 con la característica de costos relativamente reducidos, sin embargo sacrifica detección ante la traza del gas.

Algunos robots de este tipo se han presentado localmente siguiendo diversas líneas de investigación como lo son los estudiados y diseñados en el CAOyF [9; 10; 11]. Sin embargo el nivel de complejidad y lo reciente del problema hacen extenso el tratado con diversas propuestas de solución. Esto motiva la realización de un sistema versátil y económico apto para funcionar con un mínimo de elementos, o en su caso, potencializarlo agregándole otros accesorios (diseño modular); atendiendo la empresa final: localizar fuentes de gas.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

Diseñar y construir un sistema autónomo localizador de fuentes de gas para utilizarse bajo dos constricciones principales: dentro de una habitación despejada y simulando por medio de un ventilador la traza generada por una fuga de gas.

### 1.3.2. Objetivo Específicos

- Diseñar y fabricar una aproximación simple de un Olfato Electrónico.
- Caracterizar el sensor TGS 2620.
- Fabricación del Olfato con elementos de fácil adquisición.
- Emplear la Plataforma Robótica de Propósito General [12] para la movilidad.
- Simular por medio del ordenador el mayor número de aspectos.
- Diseñar un nuevo algoritmo de localización empleando el mínimo número de sensores de gas.

En todo el trabajo se ha adoptado la ideología del ingeniero Edward A. Murphy: «Si algo puede fallar, fallará». Y esto encaja muy bien en dispositivos electrónicos, pues si de un componente que se confía en su funcionamiento falla, qué pasaría con uno que es susceptible a desperfectos. Es por esto que todos los puntos vulnerables que se notaron han sido atendidos esperando que sólo las fallas inherentes tengan cabida.

## Referencias

- [1] Busto O.; *La nariz electrónica: una nueva herramienta para analizar el aroma*; Revista de Enología Científica y Profesional; [http://www.acenologia.com/ciencia60\\_2.htm](http://www.acenologia.com/ciencia60_2.htm) accesada en Noviembre 2014.
- [2] Chen S., Wang Y., Choi S.; *Applications and Technology of Electronic Nose for Clinical Diagnosis*; *Open Journal of Applied Biosensor*; 2013; páginas 39-50.
- [3] Valor I., Martínez J., Cortada C.; *Una Norma española para medir el olor: UNE-EN-13725*; Ingeniería Química; 2004; páginas 111-116.
- [4] Casper J. and Murphy R.; *Workflow Study on Human-Robot Interaction in USAR*; *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002)*; 2002; páginas 1997-2003.
- [5] Lilienthal A., Zell A.; *Experiences Using Gas Sensors on an Autonomous Mobile Robot*; *Proceedings of EUROBOT 2001, 4th European Workshop on Advanced Mobile Robots*; 2001; páginas 1-8.
- [6] Trincavelli M., Coradeschi S., Loutfi A.; *Classification of Odours with Mobile Robots Based on Transient Response*; *International Conference on Intelligent Robots and System*; 2008; páginas 4110-4115.
- [7] Gonzalez J., Monroy J., Blanco J.; *The Multi-Chamber Electronic Nose – An Improved Olfaction Sensor for Mobile Robotics*; *Sensors 2011*; 2011; páginas 6145-6164.
- [8] Song K., Liu Q., Wang Q.; *Olfaction and Hearing Based Mobile Robot Navigation for Odor/Sound Source Search*; *Sensors 2011*; 2011; páginas 2129-2154.
- [9] García J.; *Construcción de un robot para detección y localización de fugas de gas*; Tesis de Licenciatura CAOyF-FCFM-UAP; 2007.
- [10] Moreno O.; *Desarrollo de un prototipo para localizar fugas de gas*. Tesis de Maestría CAOyF-FCFM-UAP; 2010.

- [11] Moreno J.; *Optimización del Algoritmo de un Sistema de Localización de Fugas de Gas*. Tesis de Maestría CAOyF-FCFM-UAP; 2014.
- [12] Sánchez J.; *Sistema Móvil de Trayectoria Controlable*. Tesis de Licenciatura CAOyF-FCFM-UAP; 2012.



**L**A parte sensorial define en gran medida la trascendencia de este trabajo ya que con ella quedará determinado el tipo de gas a reconocer, la velocidad de este reconocimiento y la circuitería necesaria para obtener la mejor respuesta. Así, resulta de suma importancia la buena elección del sensor detector de gas basándose en el conocimiento total de las características, alcances y limitaciones, para extraer el mayor provecho del mismo.

## 2.1. Sensores MOS

Los sensores de gas de estado sólido MOS (*Metal-Oxide-Semiconductor*) representan una notable aplicación moderna de nanotecnología y procesos físico-químicos. Estos dispositivos convierten una cantidad química, como lo es la concentración, a una señal eléctrica. Este tipo de sensores semiconductores han ganado creciente interés gracias a las características ventajosas en comparación con los tradicionales sistemas de cromatografía gaseosa, los cuales son voluminosos, caros y requieren personal calificado para su operación y mantenimiento. En 1938, Wagner y Hauffe [1] fueron los primeros en descubrir que átomos y moléculas adsorbidas en la superficie de un semiconductor influenciaban sus propiedades, tal como su conductividad. Las primeras aplicaciones de estos descubrimientos arribaron con el desarrollo de los primeros sensores semiconductores químico-resistivos [2].

La captura del gas para este tipo de sensores está basada en el fenómeno de **adsorción**. La adsorción, en general, es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas de una sustancia llamada adsorbato, son atrapados o retenidos en la superficie de otro material llamado adsorbente, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen. Se presentan dos tipos de adsorción, la física y la química. La primera es debida

a las omnipresentes fuerzas de van der Waals<sup>1</sup>; la segunda, la adsorción química, se produce como consecuencia de la interacción química del adsorbente y el gas, cuya atracción es mucho más fuerte que la anterior. El caso de mayor interés, y el que presentan estos sensores, es el de un adsorbente sólido y un adsorbato gaseoso en adsorción química [3]. La capacidad de adsorción del sólido depende del área de contacto y su porosidad interna, por lo que es típico que en estos sensores se utilice un sólido con una gran área superficial por unidad de masa. La desorción, que es la operación inversa, permite liberar el gas adsorbido; esto es posible en mayor o menor grado aumentando la temperatura, disminuyendo la presión y barriendo al adsorbente con una contracorriente de aire.

Una vez adsorbido el gas, el principio de operación de los sensores de óxido de metal recae en el cambio en la conductividad del óxido bajo la interacción del gas el cual es usualmente proporcional a su concentración. Hay dos tipos de sensores de óxido de metal: tipo *n* (óxido de zinc, dióxido de estaño, dióxido de titanio o trióxido de dihierro) los cuales responden a gases reductores, y los tipo *p* (óxido de níquel, óxido de cobalto) los cuales responden a gases oxidantes.

En general, un agente *oxidante* es una especie físico-química (átomo, molécula o ión) que produce la oxidación de otra, llamada *reductor*. Ahora bien, para que una sustancia oxide a otra tiene que captar electrones, que provienen de esa otra sustancia, por lo que disminuirá su número de oxidación y por lo tanto, ella misma se reducirá. Y a la inversa, el reductor tiene que ceder electrones y, por tanto, se oxida. Las reacciones *redox* ocurren, pues, entre parejas de oxidación-reducción, según lo ilustra la Figura 2.1.

Si el sensor tipo *n* es introducido a un gas reductor como el H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> o H<sub>2</sub>S la resistencia dentro del material cae debido a que el gas reacciona con el oxígeno retenido en su superficie liberando electrones. Esto aumenta la conductividad del material. Los sensores tipo *p* responden a gases oxidantes como O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y Cl<sub>2</sub>.

De todos estos sensores MOS el más popular es el tipo *n* basado en dióxido de estaño (SnO<sub>2</sub>) debido a su disponibilidad en el mercado, relativo bajo costo y a que no requiere de circuitos acondicionadores complejos. Actualmente existen empresas que

---

<sup>1</sup> Dos átomos o moléculas separadas se atraen o repelen una a otra por fuerzas intermoleculares electrostáticas llamadas fuerzas de van der Waals. Por otro lado, los enlaces químicos se pueden dividir en tres grupos: enlaces covalentes, enlaces iónicos y enlaces metálicos; dentro de los enlaces covalentes encontramos dos tipos: enlace covalente polar y enlace covalente apolar. Para las moléculas polares surgen fuerzas de van der Waals conocidas como Fuerzas de Keesom debido a los dipolos permanentes; para las moléculas apolares, las fuerzas de van der Waals surgen de la interacción de los momentos dipolares eléctricos instantáneos de las moléculas, lo que se conoce como Fuerzas de London. A temperaturas suficientemente altas, las fuerzas de van der Waals no son bastante intensas para vencer la agitación térmica ordinaria de las moléculas, pero a temperaturas suficientemente bajas, la agitación térmica se hace despreciable y las fuerzas de van der Waals son la causa de que virtualmente todas las sustancias se condensan en forma líquida.

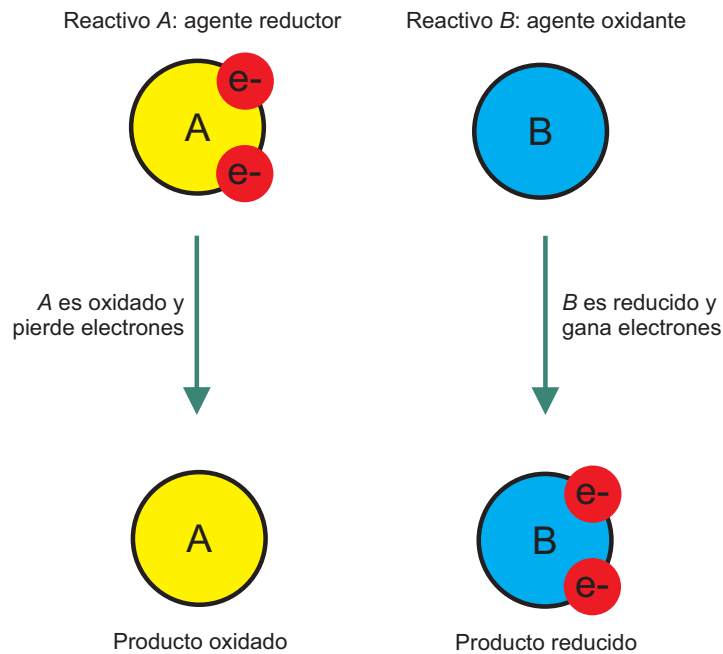


FIGURA 2.1: Oxidante: sustancia que oxida a otra, y por lo tanto se reduce (su número de oxidación disminuye). Reductor: sustancia que reduce a otra, y por lo tanto se oxida (su número de oxidación aumenta).

comercializan este tipo de sensores como la casa *Figaro* de Japón, con su modelo específico TGS 2620 tendido a vapores orgánicos [4].

Hablando de este fabricante, en la Tabla 2.1 se presentan otros sensores orientados a diversos tipos de gases. Es importante mencionar que su espectro de detección de cada sensor es mucho más amplio del mostrado en esta tabla, donde sólo se presentan las sustancias para las cuales las respuestas son más pronunciadas. Por ejemplo, en la hoja de especificaciones del TGS 2620 [4] se hace patente que el sensor detecta vapores de solventes orgánicos, mas también muestra que reacciona a muestras de hidrógeno y monóxido de carbono, teniendo su máxima reacción para el compuesto químico orgánico etanol.

Como se nota, la principal ventaja del TGS 2620 respecto a otros TGS es su respuesta al etanol (alcohol etílico,  $C_2H_6O$ ,  $CH_3CH_2OH$ ). Esto conlleva la facilidad de hallar y manipular las muestras sin correr peligros ni grandes riesgos a la salud. En este sentido, para el etanol la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) establece los Límites de Exposición Permissible PEL (*Permissible Exposure Limit*) por medio del Promedio Ponderado de Tiempo TWA (*Time-Weighted Average*):

OSHA PEL: TWA 1,000 ppm.

Modelo	Gases detectados
TGS 2600	Hidrógeno, monóxido de carbono.
TGS 2602	Amoníaco, sulfuro de hidrógeno, compuestos orgánicos volátiles.
TGS 2611	Metano.
TGS 2620	Solventes orgánicos.

TABLA 2.1: Diversos sensores *Figaro*.

Las concentraciones por TWA de los PEL de OSHA no deben excederse en ninguna jornada de 8 horas de trabajo durante una semana laboral de 40 horas [5]. Como se notará durante este trabajo, el límite establecido por la OSHA no es excedido.

## 2.2. Sensor TGS 2620

Este sensor MOS comprende de un elemento calefactor recubierto con dióxido de estaño sinterizado (gran porosidad). La cantidad física que varía es la resistencia  $R_S$  de la capa superficial del óxido a una temperatura de operación que recae en 400 °C. Expuesto a un gas reductor, la conductividad de la superficie del óxido aumenta y por lo tanto la resistencia de la superficie  $R_S$  decrece. El comportamiento del sensor sigue una relación potencial entre la resistencia eléctrica del material y la concentración del gas o vapor a medir, la cual se expresa mediante la ecuación:

$$R_S = R_S(C) = KC^{-\alpha}, \quad (2.1)$$

donde  $R_S$  es el valor de la resistencia del material para una concentración determinada,  $K$  es una constante propia del sensor,  $\alpha$  es una constante que representa la sensibilidad y  $C$  es la concentración del odorante. Todos los sensores TGS responden según la ecuación (2.1) bajo cierto rango de concentración; para el TGS 2620, esta ecuación es válida para el intervalo comprendido entre 50 ppm y 5,000 ppm. En el capítulo siguiente se determinarán las constantes por medio de la caracterización del sensor.

### 2.2.1. Estructura del TGS 2620

La Figura 2.2 muestra la estructura de TGS 2620. El material sensitivo –dióxido de estaño– se imprime sobre los electrodos (metales nobles) que han sido a su vez impresos sobre un sustrato de aluminio. Un electrodo se conecta al pin No. 2 y el otro está conectado al pin No. 3. El elemento sensitivo se calienta por el material RuO<sub>2</sub> (calefactor) impreso sobre el lado posterior del sustrato y conectado a los pines No. 1 y No. 4. La distribución de estos cuatro pines se puede notar en la Figura 2.3.

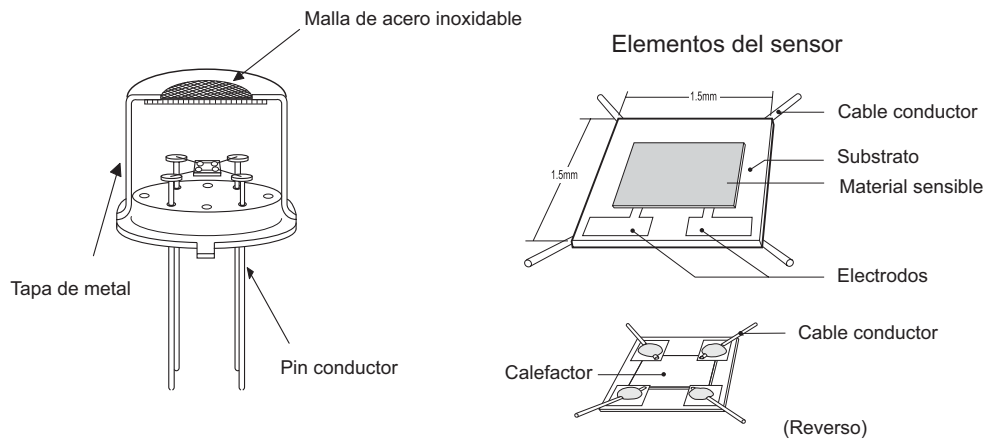


FIGURA 2.2: Estructura del sensor.



FIGURA 2.3: Sensor Figaro TGS 2620.

### 2.2.2. Respuesta

En este aspecto se pueden distinguir dos tipos de respuestas según el sistema estudiado: **estático** y **cinético**. La característica principal del sistema estático es, como su nombre bien lo sugiere, la inmovilidad del sensor respecto a la fuente del gas. La Figura 2.4 muestra el cambio en la resistencia  $R_S$  cuando al sensor le es introducida y retirada una muestra de 300 ppm de etanol, y así repetidamente, todo ello bajo el sistema estático. Debe recordarse que ante el gas reactivo la resistencia del sensor  $R_S$  decrece, como es apreciado en la figura.

Un importante distintivo es el proceso de muestreo donde muchos sistemas estáticos usan lo que se denomina «muestreo trifásico»: *estado transitorio*, *estable* y de *recuperación* (véase Figura 2.5). Primero exponiendo el arreglo sensorial a un gas de referencia para lograr el estado común llamado *base* y después al gas objetivo. Los análisis de los resultados están entonces basados en la respuesta transitoria y estable del sensor. El mecanismo comúnmente necesario para un muestreo trifásico requiere de un hardware de carga (bombas, válvulas) que son usadas para limpiar el arreglo sensorial y forzar a una recuperación del sensor antes de la ingesta de una nueva muestra.

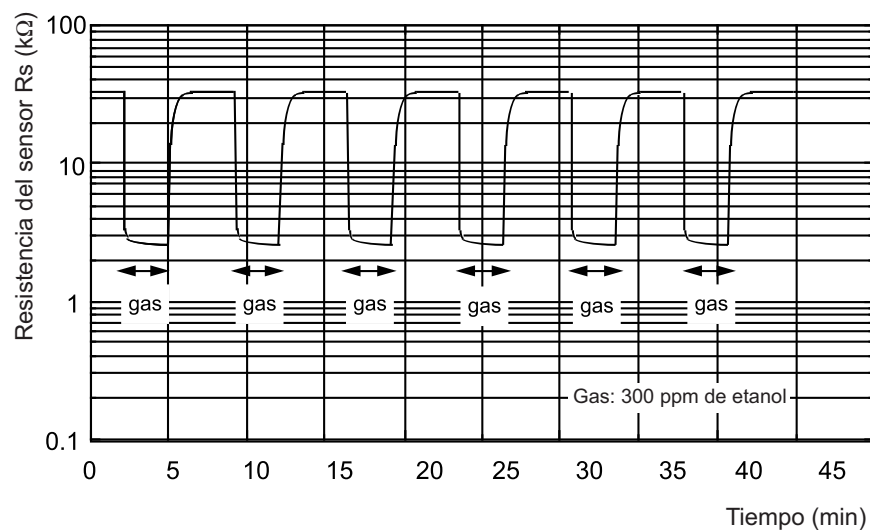


FIGURA 2.4: Respuesta del sensor y su repetibilidad [4].

En lo que respecta al sistema cinético, la respuesta del sensor de forma general prevalece, sin embargo surgen diversas dificultades. Con el fin de representar la diferencia entre un procedimiento de muestreo estático y uno cinético, la Figura 2.5 compara las lecturas recogidas de un proceso de muestreo trifásico tradicional y de una nariz electrónica que muestrea continuamente con los movimientos del robot. En la parte inferior de la Figura 2.5, la turbulencia del flujo de aire y la desigual distribución de gas se refleja en la respuesta de la señal y en la mayoría de los casos, no se llega al estado estable. Aun así, el estado transitorio es localizable.

Un enfoque basado en un sistema estático para un robot móvil requerirá que el robot parase cada cierto tiempo para que una muestra de olor fuese recolectada, y más aún, requerirá el mecanismo de limpieza por bombas mencionado anteriormente. En esta área se pueden mencionar trabajos como el de Monroy *et al.* [6] donde muestran un robot localizador de fugas de gas con la implementación de un sistema estático. Aquí la principal cualidad es el reducido tiempo de respuesta así como su precisión, echando mano de cuatro cámaras con capacidad de hasta ocho sensores TGS cada una. Su mayor desventaja: el costo, tamaño, peso, consumo de energía, hardware computacional y número de sensores.

### 2.2.3. Características eléctricas

El sensor se presenta en un robusto encapsulado TO-5 el cual incluye el calefactor. Se requiere de dos voltajes de entrada: el voltaje del calefactor  $V_H$  (*heater voltage*) y el voltaje del circuito  $V_C$ . El voltaje  $V_H$  es aplicado sólo al calefactor integrado con el objeto de mantener al elemento sensitivo a la temperatura específica de óptimo funcionamiento. El

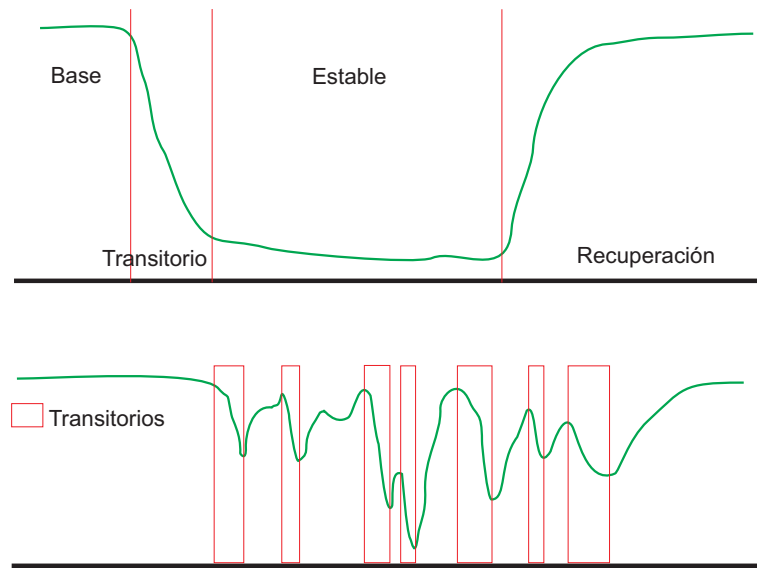


FIGURA 2.5: Superior: ejemplo de una señal colectada usando el tradicional proceso de muestreo trifásico; inferior: ejemplo de la señal colectada con un robot móvil en un ambiente no controlado [7].

voltaje  $V_C$ , por su parte, es aplicado para generar el voltaje de carga  $V_L$  (*load voltage*) a través de la resistencia de carga  $R_L$  (*load resistor*) la cual es conectada en serie al sensor.

En este trabajo se utilizó una fuente común para los voltajes  $V_H$  y  $V_C$  teniéndose como  $V_H = V_C = +5.03$  V. El valor de la resistencia de carga  $R_L$  es escogida para optimizar los valores umbrales del sensor, guardando siempre la precaución de no sobrepasar la potencia máxima  $P_S = 15$  mW permitida para el semiconductor mediante el cuidado de siempre  $R_L > 450$   $\Omega$ . Diversas especificaciones son mostradas en la Tabla 2.2. El fabricante hace énfasis en que los datos de sensibilidad de dicha tabla fueron obtenidos con un pre-calentamiento de siete días y bajo «**condiciones estandar**»:

- 20 °C, 65 % HR,
- $V_C = 5.0$  V CD,
- $V_H = 5.0$  V CD,
- $R_L = 10.0$  k $\Omega$ .

Con respecto a la Figura 2.3, la conexión de los pines es la siguiente:

1. Calefactor (sin polaridad),
2. Electrodo del sensor (-),

Modelo	TGS 2620
Encapsulado	TO-5 metálico
Gases objetivo	Alcohol, solventes
Rango típico de detección	50 - 5000 ppm
Voltaje del calefactor $V_H$	5.0 V CC/CA
Voltaje del circuito $V_C$	5.0 V CC/CA $P_S < 15$ mW
Resistencia de carga $R_L$	Variable, 450 $\Omega$ mínimo
Consumo del calefactor	42 mA
Resistencia del sensor $R_S$	1 k $\Omega$ - 5 k $\Omega$ para 300 ppm de etanol

TABLA 2.2: Especificaciones del sensor [4]

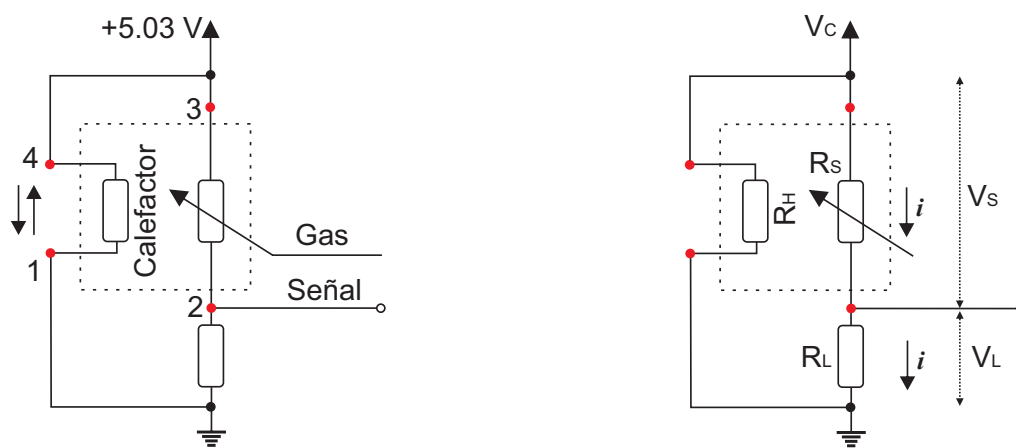


FIGURA 2.6: Acondicionador de salida.

3. Electrodo del sensor (+),
4. Calefactor (sin polaridad).

#### 2.2.4. Acondicionador de salida

Como se mencionó con anterioridad, una de las principales ventajas de este sensor es la sencillez del circuito para obtener mediciones. Se trata simplemente de un divisor de voltaje comprendido por las resistencias  $R_S$  y  $R_L$ , así como lo muestra la Figura 2.6. El voltaje  $V_C$ , con el valor de +5.03 V, es la diferencia de potencial entre el terminal 3 y/o 4 del sensor y la tierra del circuito. La resistencia variable  $R_S$  representa la variación en la resistencia del óxido de metal de acuerdo con la concentración del gas (**entre mayor concentración, menor valor de  $R_S$** ). El voltaje  $V_L$ , el presente en la resistencia de carga, se obtiene a partir de las mediciones realizadas con el sistema y es llamado «la señal del sensor».

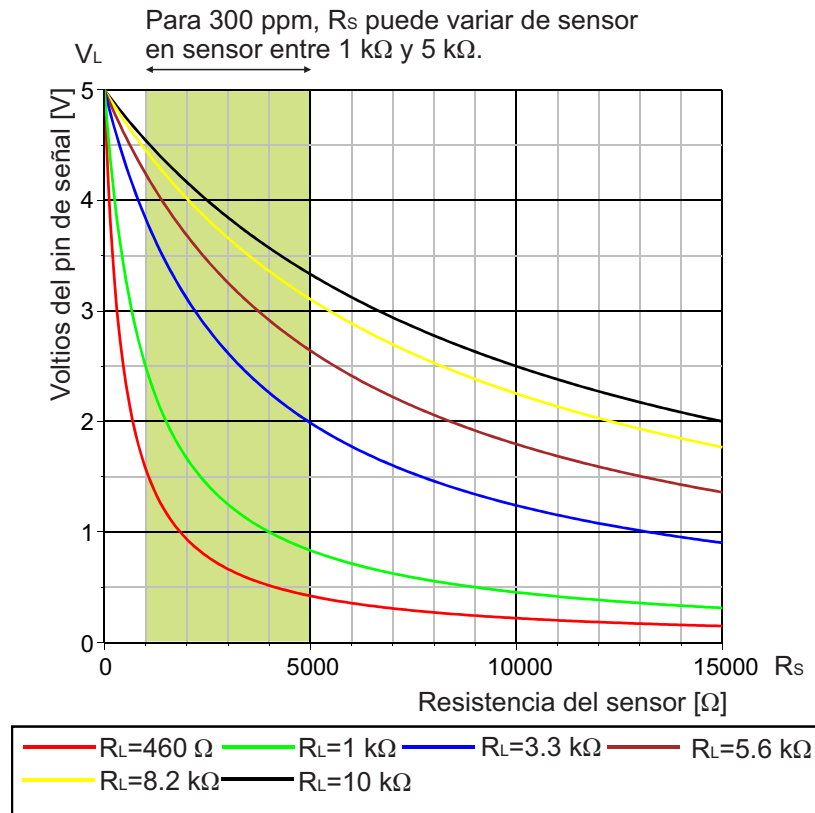


FIGURA 2.7: Divisor de voltaje:  $V_L$  contra  $R_S$ , con diversos valores de  $R_L$ .

De la Figura 2.6 se puede demostrar que el valor de  $V_L$  en términos de  $R_S$ , es decir  $V_L = V_L(R_S)$ , es:

$$V_L(R_S) = \frac{V_C R_L}{R_S + R_L}. \tag{2.2}$$

Para esta función  $R_L$  podrá tomar cualquier valor arriba de 450  $\Omega$ . En la Figura 2.7 se muestra graficada la función (2.2) con diversos valores de  $R_L$  (comerciales) para así notar la trascendencia de esta resistencia.

Por otro lado, se debe mantener el consumo de energía  $P_S$  del semiconductor por debajo de un límite de 15 mW. La potencia para el sensor según la Figura 2.6 es  $P_S = \frac{(V_C - V_L)^2}{R_S}$ , en donde se sustituye  $V_L$  dado por la Ecuación (2.2) para obtener  $P_S = P_S(R_S)$ :

$$P_S(R_S) = R_S \left( \frac{V_C}{R_S + R_L} \right)^2. \tag{2.3}$$

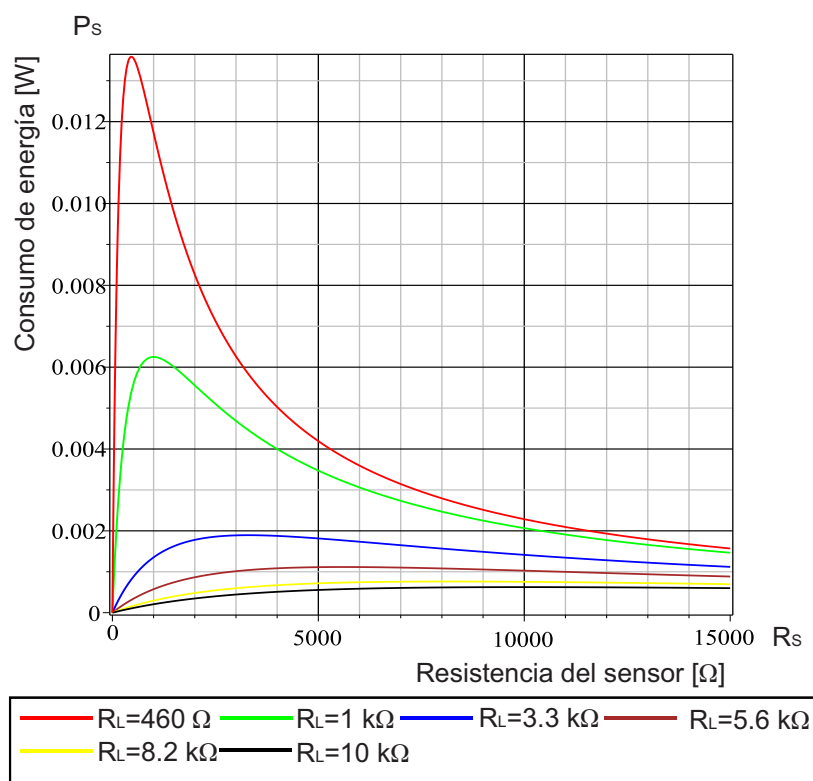


FIGURA 2.8: Consumo de energía del sensor:  $P_S$  contra  $R_S$ , con diversos valores de  $R_L$ .

Se gráfica esta expresión para los mismos valores de  $R_L$  presentados en la Figura 2.7, gráfica que puede ser contemplada en la Figura 2.8. Se nota de ésta que la función  $P_S(R_L)$  tiene un máximo justo cuando  $R_S = R_L$  lo cual es demostrado usando Cálculo desde la expresión analítica (2.3). De la gráfica también queda claro que el valor mínimo comercial para  $R_L$  será de  $460 \Omega$  pues con ella el valor máximo posible de la potencia  $P_S$  está cercana a los 15 mW.

### 2.2.5. Resistencia de carga $R_L$

La señal de salida es obtenida a través de  $R_L$  la cual también actúa como un protector regulador de potencia ( $P_S < 15 \text{ mW}$ ). La apropiada selección de  $R_L$  para situaciones específicas proveerán al sensor de las mejores características de operación. Para su elección primeramente se tiene que entender el papel de ésta sobre el funcionamiento del sensor y/o la señal del mismo.

Es claro que la elección de  $R_L$  no repercutirá en la respuesta de  $R_S$  cuando el sensor se halle ante la presencia del gas objetivo puesto que  $R_S$  sólo variará según la concentración del gas;  $R_S$  **variará de la misma forma sea cual sea el valor de  $R_L$ .**

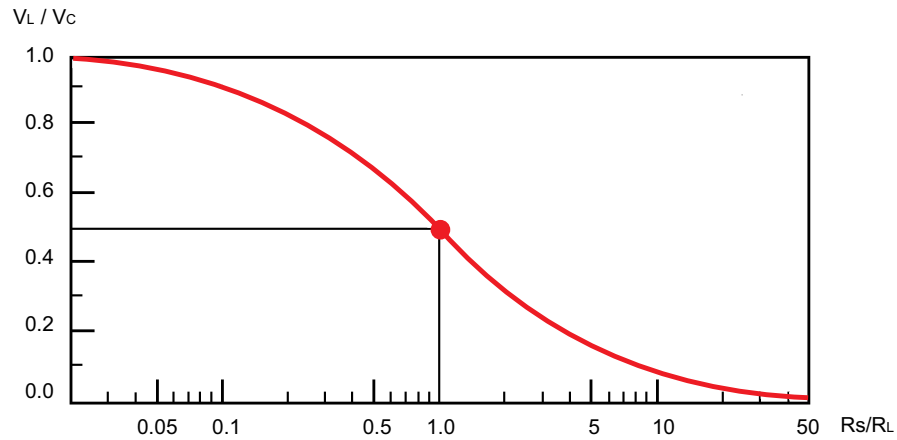


FIGURA 2.9: Relación entre  $R_S/R_L$  y  $V_L/V_C$  [3].

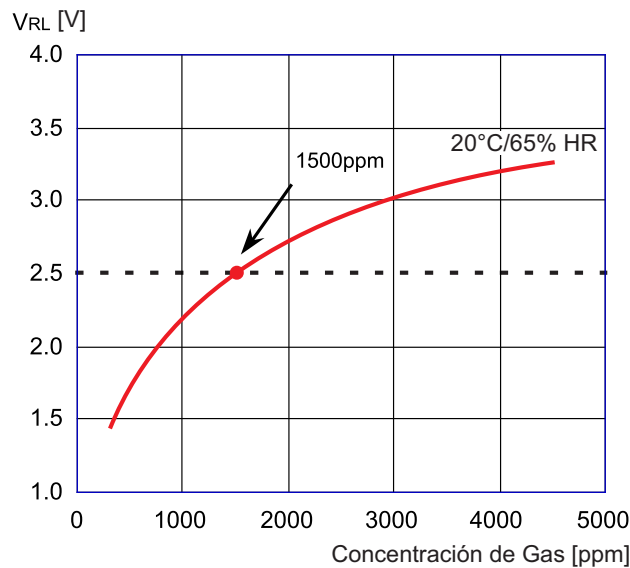


FIGURA 2.10: Ejemplo para determinar  $R_L$  [3].

Dado que se trata de un divisor de voltaje,  $R_L$  tendrá un impacto en la exhibición de los datos. La Figura 2.9 muestra la relación entre  $R_S/R_L$  y  $V_L/V_C$ . En el punto donde  $R_S/R_L = 1$ , la pendiente de  $V_L/V_C$  es máxima. En este punto, la resolución óptima de la señal puede ser obtenida. Como resultado, es recomendable usar una  $R_L$  tal que  $R_S/R_L$  tenga un valor igual a 1.0 en la concentración preferentemente a detectar. Es evidente de (2.2) que cuando esta condición es cumplida se tiene  $V_L = V_C/2$  lo que se traduce en la mayor resolución para atender fluctuaciones en torno a la concentración de interés.

Si por ejemplo,  $V_C = 5.0$  V y se requirieran mediciones de concentración alrededor de 1,500 ppm, concentración para la cual supóngase  $R_S = 1,000 \Omega$ , entonces  $R_L$  quedará determinada tal que  $R_S = R_L = 1,000 \Omega$  para así exhibir lecturas por arriba de 1,500 ppm entre 2.5 V – 5.0 V, lecturas por debajo de 1,500 ppm entre 2.5 V – 0.0 V y para el valor de 1,500 ppm exhibir exactamente 2.5 V, según lo muestra la Figura 2.10.

## Referencias

- [1] Wagner C., Hauffe K.; *Untersuchungen über den stationären zustand von. Katalysatoren bei heterogenen reaktionen*; *Ztschr. Elektrochem*; 1938; página 172.
- [2] Taguchi N.; *Gas detecting device*; *U.S. Patent No. 3631436*; 1971.
- [3] *General Information For TGS Sensors*.
- [4] *Technical Information For TGS 2620*.
- [5] *Occupational Safety & Health Administration*; [https://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH\\_239700.html](https://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_239700.html) accesada en Noviembre 2014.
- [6] Gonzalez J., Monroy J., Blanco J.; *The Multi-Chamber Electronic Nose –An Improved Olfaction Sensor for Mobile Robotics*; *Sensors 2011*; 2011; páginas 6145-6164.
- [7] Trincavelli M., Coradeschi S., Loutfi A.; *Classification of Odours whit Mobile Robots Based on Transient Response*; *International Conference on Intelligent Robots and System*; 2008; páginas 4110-4115.



## Caracterización del TGS 2620

**D**ADO el principio físico del sensor TGS 2620, el fabricante recomienda realizar la caracterización de cada uno de ellos para así obtener lecturas con un bajo índice de error. El procedimiento estricto de caracterización requerirá generar concentraciones en su rango típico de detección que va desde las 50 ppm a las 5,000 ppm con el fin de obtener la curva característica del sensor a emplear. Una vez establecido un procedimiento, la caracterización se podrá realizar de forma sistemática para cualquier sensor TGS 2620.

### 3.1. La caracterización es necesaria

Bajo el circuito de la Figura 2.6 es obtenido el valor de  $V_L$  el cual como se mencionó, es la señal misma del sensor. Las lecturas recibidas de este voltaje deberán entenderse como la única variación del sensor hacia diversas concentraciones de gas, esto es, a mayor concentración de gas menor valor de  $R_S$  lo que conlleva un menor valor de  $V_S$  y así a un mayor valor de  $V_L$ . Sin embargo, es común que la concentración de cualquier gas sea medida en partes por millón [ppm]<sup>1</sup>, lo que en este trabajo significa:

$$1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ volumen de gas etanol}}{10^6 \text{ volúmenes de aire}} \quad \rightarrow \quad \overbrace{1 \text{ ppm} = \frac{1 \mu\text{l de gas de etanol}}{1 \text{ l de aire}}}^{\text{Por ejemplo}}, \quad (3.1)$$

entonces se deberá laborar un tanto más para convertir los voltios que nos arroja  $V_L$  a partes por millón como es debido para una concentración. Y aquí justamente una de las mayores desventajas de este sensor: no existe un factor o fórmula de conversión general para cambiar los voltios a partes por millón, y esto puesto que las características físicas varían de sensor a sensor lo que trae como consecuencia que no haya dos sensores iguales.

<sup>1</sup>Análogamente se tiene el concepto de porcentaje %: «partes por cien» [ppc].

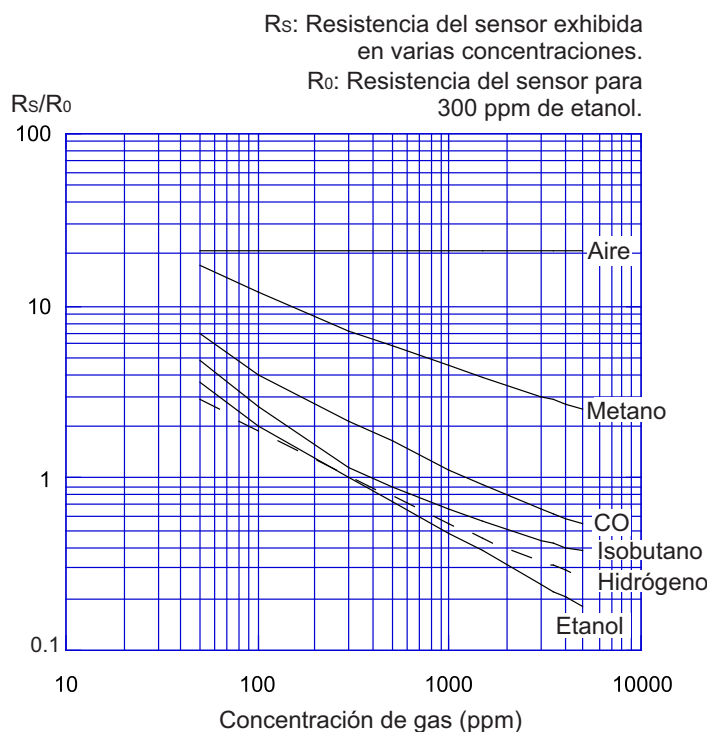


FIGURA 3.1: Características de sensibilidad del TGS 2620 en condiciones estándar: 20 °C/65% HR [1].

En otras palabras, ya que la curva  $R_S$  (o su correspondiente salida de voltaje  $V_L$ ) varían de sensor a sensor, entonces:

**La calibración es requerida para cada uno de los sensores TGS.**

En la Figura 3.1 se muestra la curva típica de los TGS 2620 [1]. En ella,  $R_0$  representa la resistencia del sensor para 300 ppm de etanol. Como se nota, se grafica  $R_S/R_0$  contra concentración, y no simplemente  $R_S$  contra concentración. Esto es así ya que para cada uno de los TGS 2620 habrá valores distintos de  $R_S$  para una misma concentración. Por ejemplo, para tres sensores distintos, con una concentración de 300 ppm se podría tener según la Figura 3.1:

$$\frac{R_S}{R_0} = \frac{1,000 \Omega}{1,000 \Omega} = 1, \quad \frac{R_S}{R_0} = \frac{3,000 \Omega}{3,000 \Omega} = 1, \quad \frac{R_S}{R_0} = \frac{5,000 \Omega}{5,000 \Omega} = 1,$$

lo que significa que a 300 ppm uno de los sensores respondería con  $R_S = 1,000 \Omega$ , otro sensor con  $R_S = 3,000 \Omega$  y el último con  $R_S = 5,000 \Omega$ . Nótese en la Tabla 2.2 que para 300 ppm se tiene un rango de  $R_S$  que va de 1 k $\Omega$  - 5 k $\Omega$ .

### 3.2. En busca de $K$ y de $\alpha$

El objetivo fundamental de la caracterización es hallar los valores de las constantes  $K$  y  $\alpha$  de la ecuación (2.1); con estos valores, la curva única del sensor en cuestión quedará determinada. De la ecuación  $R_S = KC^{-\alpha}$  se tiene:

$$\log R_S = -\alpha \log C + \log K, \quad (3.2)$$

la cual puede tratarse como una recta  $y = mx + b$  si:

$$y = \log R_S, \quad m = -\alpha, \quad x = \log C, \quad b = \log K.$$

Para determinar por completo esta recta son necesarios dos parámetros, que en este caso serán dos puntos  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$  que la conformen:

$$(x_1, y_1) = (\log C^{[1]}, \log R_S^{[1]}) \quad \wedge \quad (x_2, y_2) = (\log C^{[2]}, \log R_S^{[2]});$$

donde los valores  $(C^{[1]}, R_S^{[1]})$  y  $(C^{[2]}, R_S^{[2]})$  se obtendrán mediante inyecciones de etanol líquido para generar la concentración  $C^{[n]}$  para luego determinar la resistencia  $R_S^{[n]}$  asociada a dicha concentración. Una vez definidos los puntos  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$  se tendrá:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = mx_1 + b \\ y_2 = mx_2 + b \end{array} \right\} \quad \text{con las incógnitas } m \wedge b.$$

La solución de este sistema lineal es:

$$m = \frac{\begin{vmatrix} y_1 & 1 \\ y_2 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad \wedge \quad b = \frac{\begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{x_1 - x_2},$$

con  $\alpha = -m$  y  $K = 10^b$ .

### 3.3. De microlitros a partes por millon

De la sección anterior se ha notado que los puntos  $(x_1, y_1) = (\log C^{[1]}, \log R_S^{[1]})$  y  $(x_2, y_2) = (\log C^{[2]}, \log R_S^{[2]})$  son suficientes para definir los parámetros de la ecuación  $R_S = KC^{-\alpha}$  otorgada por el fabricante. Entonces, para obtener la curva característica del sensor TGS es necesario calcular dos valores resistivos  $R_S$  para dos concentraciones

$C$  concretas de etanol. Pero para esto es necesario definir el medio y establecer el procedimiento para generar con fiabilidad dichas concentraciones de etanol.

En este punto del proyecto la pregunta es: en cierto volumen de aire, ¿cuántas partes por millón de gas etanol se genera con cierto volumen de etanol líquido? La pregunta surge ya que el etanol a temperatura ambiente se halla en forma líquida y así resulta fácil su manipulación; una muestra líquida, al evaporarse genera gas de etanol, que confinado en cierto volumen de aire, se traduce en cierta concentración. ¿Cuál será entonces su concentración en partes por millón? Es claro que dependerá del volumen de aire y del volumen de la muestra de etanol líquido inyectada.

### 3.3.1. Factor de Compresibilidad

Para determinar el volumen de gas de etanol —y con ello posteriormente la concentración— que genera cierta cantidad de líquido, primero se debe determinar si se comporta como un gas ideal o como un gas real bajo las condiciones de temperatura y presión en las que se realizará la caracterización del sensor: 0.77 atm (presión atmosférica en la Ciudad de Puebla [2]) y 293 K ( $\sim 20$  °C). En diversas ramas de la ingeniería es frecuente presentar la ecuación del gas ideal-real como:

$$PV = ZnRT, \quad (3.3)$$

donde  $Z$  es conocido como el **factor de compresibilidad**, una propiedad termodinámica útil para modificar la ley de los gases ideales para ajustarse al comportamiento de un gas real. De forma general,  $Z$  es expresada de la forma:

$$Z = Z(T_r, P_r, \omega) = Z^{(0)}(T_r, P_r) + \omega Z^{(1)}(T_r, P_r).$$

Introducida por Pitzer *et al.* (1955) [3], esta expresión hace uso de las funciones  $Z^{(0)}$  y  $Z^{(1)}$  las cuales dependen de la temperatura reducida  $T_r$  y la presión reducida  $P_r$  del gas, y de un tercer parámetro  $\omega$ , el conocido Factor Acéntrico Pitzer el cual mide la desviación en la presión de vapor de un compuesto respecto a gases nobles ( $\omega = 0$ ). Para un gas ideal, el factor de compresibilidad es  $Z = 1$  por definición.

Las propiedades reducidas del fluido están definidas por:

$$P_r = \frac{P}{P_c} = \frac{\text{Presión actual}}{\text{Presión crítica}} \quad \wedge \quad T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{\text{Temperatura actual}}{\text{Temperatura crítica}}.$$

Juntas,  $P_c$  y  $T_c$ , definen el punto crítico de un fluido sobre el cual no existe una distinción entre sus fases líquida y gaseosa (cuerpo homogéneo con propiedades tanto de líquido

como de gas). Para el etanol  $P_c = 62$  atm y  $T_c = 514$  K [4]; entonces, en 0.77 atm y 293 K se tiene  $P_r = 0.01$  y  $T_r = 0.57$ . Junto a estas cantidades se observa  $\omega = 0.649$  para el etanol [3].

Diversas revisiones a las tablas y gráficas originales (1958) de los valores experimentales  $Z^{(0)}$  y  $Z^{(1)}$ , así como extensiones a intervalos más amplios de  $T_r$  y  $P_r$  han sido publicadas, de entre las cuales destacan las tablas Lee-Kesler (1975) [5]; en ellas es posible encontrar datos profusos de  $Z^{(0)}$  y  $Z^{(1)}$ . Como lo hace notar Haile [6], se debe conocer la fase de la sustancia antes de leer las tablas Lee-Kesler pues no necesariamente proporcionarán los datos correspondientes. Por ejemplo, el etanol en condiciones de  $P_r = 0.01$  y  $T_r = 0.57$  se presentará en fase líquida y gaseosa (por evaporación), obteniéndose dos valores de  $Z$  para cada una. A saber, Liley *et al.* [7] reporta para etanol líquido a  $P_r = 0.02$  y  $T_r = 0.58$  (1 atm, 300 K),  $Z = 0.0024$ ; mientras que Haile permite calcular para etanol líquido a  $P_r = 0.01$  y  $T_r = 0.57$  (0.77 atm, 293 K) un factor de  $Z = 0.0023$ .

Infortunadamente las tablas Lee-Kesler no proporcionan información de  $Z^{(0)}$  y  $Z^{(1)}$  para  $T_r = 0.57$  (20 °C), pero sí para  $T_r = 0.55$  (10 °C) y  $T_r = 0.60$  (36 °C):

$$Z(0.55, 0.01) = (0.9804) + (0.649)(-0.0314) = 0.960,$$

$$Z(0.60, 0.01) = (0.9849) + (0.649)(-0.0205) = 0.971,$$

de ahí que para el etanol a  $P_r = 0.01$  (0.77 atm) y  $T_r = 0.57$  (20 °C), que es el caso, se tendrá  $0.96 < Z < 0.97$ . Esta magnitud cobrará menor o mayor importancia según la aplicación.

### 3.3.2. Ecuación de Concentración

La introducción del factor de compresibilidad  $Z$  hace de la ecuación del gas ideal la ecuación del gas etanol:

$$PV_{eg} = n_e ZRT, \quad (3.4)$$

- $P$ : Presión atmosférica,
- $V_{eg}$ : Volumen del etanol gaseoso,
- $n_e$ : Número de moles de la muestra líquida de etanol,
- $Z$ : Factor para el gas de etanol bajo las condiciones especificadas,

- $R$ : Constante de los gases ( $0.082 \frac{\text{atm}\cdot\text{l}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$ ),
- $T$ : Temperatura del gas.

$$\Rightarrow V_{eg} = V_{eg}(n) = \frac{n_e ZRT}{P}. \quad (3.5)$$

La ecuación anterior denota el volumen del gas etanol en función de la cantidad de moles de etanol  $n_e$ , a una temperatura  $T$  y presión  $P$  fijas y ambientales. Para determinar el número de moles de etanol  $n_e$  a partir de una muestra líquida de volumen  $V_{el}$  y densidad  $\rho_e$  se vale de las siguientes relaciones:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{\text{masa del elemento-compuesto}}{\text{masa atómica-molar}}, \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow n_e = \frac{m_e}{M_e} = \frac{\rho_e V_{el}}{M_e},$$

$$\therefore n_e = n_e(V_{el}) = \frac{\rho_e V_{el}}{M_e}, \quad (3.7)$$

con  $M_e$  la masa molar del etanol ( $M_e = 46.06 \text{ g/mol}$ ) y  $\rho_e$  la densidad del etanol líquido (789 g/l a 20°C y 1 atm [7]). Ergo, de las ecuaciones (3.5) y (3.7):

$$V_{eg} = V_{eg}(V_{el}) = \left( \frac{\rho_e V_{el}}{M_e} \right) \left( \frac{ZRT}{P} \right). \quad (3.8)$$

De las relaciones expresadas en (3.1) se comprende que un volumen de aire  $V_a$  –donde se expandirá el gas de etanol– equivaldría a los  $10^6$  volúmenes (análogo al 100 %):

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a \rightarrow 10^6 \text{ ppm} \\ V_{eg} \rightarrow C \end{array} \right\}.$$

Así entonces la concentración  $C$  de etanol en el volumen  $V_a$  será<sup>2</sup>:

$$C = \frac{V_{eg}}{V_a} \times 10^6 \quad [\text{ppm}]. \quad (3.9)$$

---

<sup>2</sup>En la segunda relación de (3.1) se observa que  $V_a = 1 \text{ l}$  y  $V_{eg} = 1 \mu\text{l}$ , entonces empleando (3.9):  $C = \frac{1 \mu\text{l}}{1 \text{ l}} \times 10^6 \text{ ppm} = 1 \text{ ppm}$ .

Sólo restará sustituir (3.8) en (3.9) para obtener:

$$C = C(V_{el}) = \left( \frac{1}{V_a} \right) \left( \frac{\rho_e V_{el}}{M_e} \right) \left( \frac{ZRT}{P} \right) \times 10^6 \quad [\text{ppm}], \quad (3.10)$$

con las unidades [g], [mol], [atm], [l], [K].

### 3.3.3. Factor de Conversión

Como se ha mencionado con anterioridad, las partes por millón es un concepto análogo al porcentaje y como éste también resulta una cantidad adimensional, sin embargo, la concentración también puede expresarse en términos de densidad, esto es según las variables antes definidas:

$$\frac{\text{masa de etanol dentro de la cámara}}{\text{volumen de la cámara}} = \frac{m_e}{V_a} = \frac{\rho_e V_{el}}{V_a}$$

Es habitual encontrar las concentraciones en unidades métricas como [mg/m<sup>3</sup>] en lugar de [ppm] lo que hace necesario definir factores de conversión entre uno y otro. Para ello, nótese que la concentración  $C$  es generada por la inyección  $V_{el}$ , esto equivale a:

$$C \leftrightarrow \frac{\rho_e V_{el}}{V_a} \Rightarrow 1 \text{ ppm} \leftrightarrow \frac{\rho_e V_{el}}{V_a C}$$

Sustituyendo (3.10) en la expresión última y simplificando:

$$1 \text{ ppm} \leftrightarrow \frac{\rho_e V_{el}}{V_a C} = M_e \left( \frac{P}{ZRT} \right) \times 10^{-6} \quad [\text{g/l}].$$

Por lo tanto, 1 ppm en unidades [mg/m<sup>3</sup>] está definido por:

$$1 \text{ ppm} \leftrightarrow M_e \left( \frac{P}{ZRT} \right) \quad [\text{mg/m}^3]. \quad (3.11)$$

De esta expresión, se reconoce el llamado «volumen molar»  $V_m$ , el volumen que ocupa un mol de sustancia:

$$V_m = \frac{ZRT}{P} \quad [\text{l/mol}]. \quad (3.12)$$

El *National Center for Biotechnology Information* [4] otorga el factor para el etanol utilizando el volumen molar de un gas ideal (24.45 l/mol) en condiciones estándar (25 °C, 1 atm) y  $Z = 1$ :

$$(25 \text{ °C}, 1 \text{ atm}) : 1 \text{ ppm} \leftrightarrow 1.88 \text{ mg/m}^3.$$

Mediante el uso de la ecuación deducida (3.11) se obtiene:

$$(25 \text{ °C}, 1.00 \text{ atm}, Z = 0.97) : 1 \text{ ppm} \leftrightarrow 1.94 \text{ mg/m}^3, \quad (3.13)$$

$$(20 \text{ °C}, 0.77 \text{ atm}, Z = 0.96) : 1 \text{ ppm} \leftrightarrow 1.53 \text{ mg/m}^3. \quad (3.14)$$

Si para el resultado (3.13) se introdujera  $Z = 1$  (gas ideal) en lugar de  $Z = 0.97$  se obtendría efectivamente  $1 \text{ ppm} \leftrightarrow 1.88 \text{ mg/m}^3$ . Ya de paso con (3.12) se calcula los valores de  $V_m$  para el etanol en ambas condiciones: 23.7 l/mol y 29.9 l/mol, respectivamente.

### 3.4. Inyecciones

Esta sección corresponde a la parte de medición de  $V_L$  para una concentración  $C$  generada por una inyección de etanol líquido en cierto volumen de aire  $V_a$ . La medición de  $V_L$  permitirá el cálculo de  $R_S$  estableciendo la relación  $(C, R_S)$  necesaria para determinar los parámetros  $\alpha$  y  $K$ .

El fabricante nos dice que la ecuación  $R_S = KC^{-\alpha}$  es válida dentro del rango de concentración 50 ppm - 5,000 ppm así que cualquier concentración generada con el objeto de definirla debe estar dentro de dicho intervalo. En la Sección 3.2 se hizo evidente la necesidad de generar dos concentraciones,  $C^{[1]}$  y  $C^{[2]}$ . Este par de concentraciones serán las generadas por la inyección de  $V_{el}^{[1]} = 1 \text{ }\mu\text{l}$  y de  $V_{el}^{[2]} = 25 \text{ }\mu\text{l}$ , respectivamente. Se hace uso de la ecuación (3.10) para calcular la concentración del gas producido por la evaporación del etanol inyectado con los siguientes valores:

- $V_a = 2.6 \text{ l}$ ,
- $M_e = 46.06 \text{ g/mol}$ ,
- $\rho_e = 789 \text{ g/l}$ ,
- $P = 0.77 \text{ atm}$ ,
- $T = 293 \text{ K}$ ,

<b>Evento</b>	$V_L^{[1]}$ [V]	$R_S^{[1]}$ [ $\Omega$ ]	$V_L^{[2]}$ [V]	$R_S^{[2]}$ [ $\Omega$ ]
1	3.577	1031	4.662	771
2	3.577	1042	4.667	760
3	3.582	1032	4.662	771
4	3.572	1042	4.667	760
5	3.577	1042	4.662	771
6	3.587	1042	4.667	760
7	3.577	1031	4.667	760
8	3.582	1042	4.667	760

TABLA 3.1: Medición de  $V_L^{[n]}$  y cálculo de  $R_S^{[n]}$  ante la presencia de  $C^{[1]} = 197$  ppm ( $V_{el}^{[1]} = 1 \mu\text{l}$ ) y  $C^{[2]} = 4,934$  ppm ( $V_{el}^{[2]} = 25 \mu\text{l}$ ) en una cámara de 2.6 l a  $20 \pm 1$  °C y  $42 \pm 2$  % HR. Se tienen los valores de  $V_C = 5.03$  V y  $R_L = 9,770 \Omega$ , con una resolución en  $V_L$  de 5 mV.

- $R = 0.082 \frac{\text{atm}\cdot\text{l}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$ ,
- $Z = 0.96$ .

Esto es, inyecciones a una cámara de 2.6 l de etanol puro (99.7 %) en condiciones estáticas de temperatura y presión, con su correspondiente factor de compresibilidad. Los resultados para  $V_{el}^{[1]} = 1 \mu\text{l}$  y  $V_{el}^{[2]} = 25 \mu\text{l}$  a 20 °C según la expresión (3.10) son:

$$\text{Inyección de } V_{el}^{[1]} = 1 \mu\text{l} \quad \longrightarrow \quad \text{Generación de } C^{[1]} = 197 \text{ ppm}, \quad (3.15)$$

$$\text{Inyección de } V_{el}^{[2]} = 25 \mu\text{l} \quad \longrightarrow \quad \text{Generación de } C^{[2]} = 4,934 \text{ ppm}. \quad (3.16)$$

Para inyectar con precisión estos volúmenes de etanol se emplea una microjeringa de 50  $\mu\text{l}$  marca *Hamilton* modelo 80500/705N [8].

La Tabla 3.1 muestra la medición estable de  $V_L$  y su correspondiente cálculo de  $R_S$  para una inyección de 1  $\mu\text{l}$  y 25  $\mu\text{l}$ . Con el fin de controlar la temperatura dentro de la cámara, se usó un baño térmico según lo muestra la Figura 3.2: la cámara está sumergida en agua a cierta temperatura establecida por un calentador eléctrico de inmersión; dentro de la cámara se halla la parte sensitiva de un termómetro ofreciendo la temperatura de la mezcla en el interior. La masa molecular del etanol es de 46.06 g/mol mientras que la del aire seco es de 28.97 g/mol lo que se traducirá en una mezcla no uniforme dentro de la cámara puesto que el vapor de etanol es más pesado que el aire; para solventar este detalle se ha introducido en la cámara un ventilador de 2". Se procedió de la siguiente forma:



FIGURA 3.2: Baño térmico. Se tienen los valores eléctricos:  $V_C = 5.03 \text{ V}$  y  $R_L = 9,770 \Omega$ .

1. En un inicio apagado y frío, se calentó el sensor en aire limpio por 5 minutos; después todos los elementos se introdujeron en la cámara hermética.
2. Por medio del orificio destinado a este fin se inyectó el etanol líquido a la cámara en condiciones ambientales de temperatura ( $\sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
3. Con el fin de acelerar y asegurar la evaporación se elevó la temperatura dentro de la cámara a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  por medio del baño térmico ( $\sim 10$  minutos).
4. Una vez alcanzados los  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  se aguardó 10 minutos a dicha temperatura –tiempo de sobra para la estabilización de  $V_L$ – para después extraer la cámara del baño térmico.
5. Ya fuera del baño, se esperó a que la temperatura de la mezcla interior llegase a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\sim 15$  minutos) para inmediatamente encender el ventilador.
6. Cuando la temperatura arribó a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , se capturó la lectura de  $V_L$ .
7. Para una nueva medición, se desconecta el sensor con el fin de enfriarlo ( $\sim 5$  minutos), se limpia la cámara y se procede según el punto número uno.

A continuación se presentan los dos promedios de  $R_S^{[n]}$  obtenidos de la Tabla 3.1 los cuales se tomarán como los valores asociados a una concentración de 197 ppm y 4,934 ppm:

$$\bar{R}_S^{[1]} = 3,961 \Omega \text{ con una desviación estándar poblacional de } \sigma^{[1]} = 16 \Omega.$$

$$\bar{R}_S^{[2]} = 764 \Omega \text{ con una desviación estándar poblacional de } \sigma^{[2]} = 5 \Omega.$$

Se emplea la «regla práctica del intervalo» para calcular los valores mínimo y máximo:

$$R_S^{[1]} \left\{ \begin{array}{l} \text{Valor máximo común} = \bar{R}_S^{[1]} + 2\sigma^{[1]} \\ \phantom{\text{Valor máximo común}} = 3,961 \Omega + 2(16 \Omega) = 3,993 \Omega. \\ \text{Valor mínimo común} = \bar{R}_S^{[1]} - 2\sigma^{[1]} \\ \phantom{\text{Valor mínimo común}} = 3,961 \Omega - 2(16 \Omega) = 3,929 \Omega. \end{array} \right.$$

$$R_S^{[2]} \left\{ \begin{array}{l} \text{Valor máximo común} = \bar{R}_S^{[2]} + 2\sigma^{[2]} \\ \phantom{\text{Valor máximo común}} = 764 \Omega + 2(5 \Omega) = 774 \Omega. \\ \text{Valor mínimo común} = \bar{R}_S^{[2]} - 2\sigma^{[2]} \\ \phantom{\text{Valor mínimo común}} = 764 \Omega - 2(5 \Omega) = 754 \Omega. \end{array} \right.$$

Con base en estos resultados, se espera que, con un 95 % de certidumbre, el valor de  $R_S^{[n]}$  se presente entre  $3,929 \Omega \leq R_S^{[1]} \leq 3,993 \Omega$  y  $754 \Omega \leq R_S^{[2]} \leq 774 \Omega$ . Se tomará efectivamente los valores medios:

$$(C^{[1]}, R_S^{[1]}) = (197 \text{ ppm}, 3\,961 \Omega), \quad (3.17)$$

$$(C^{[2]}, R_S^{[2]}) = (4\,934 \text{ ppm}, 764 \Omega). \quad (3.18)$$

### 3.5. Ecuación característica

Con los pares (3.17) y (3.18) se otorgan valores a las relaciones expresadas en la Sección 3.2:

$$(x_1, y_1) = (\log C^{[1]}, \log R_S^{[1]}) = (2.2944, 3.5978),$$

$$(x_2, y_2) = (\log C^{[2]}, \log R_S^{[2]}) = (3.6931, 2.8830),$$

con los cuales es posible hallar, según lo expuesto en la Sección 3.2, los valores numéricos de  $K$  y  $\alpha$ :

$$m = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = -0.5110 \quad \wedge \quad b = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{x_1 - x_2} = 4.7702$$

$$\Rightarrow \quad \alpha = -m = 0.5110 \quad \wedge \quad K = 10^b = 58\,913,$$

$$\therefore \boxed{R_S = R_S(C) = (58.91)C^{-0.5110} \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C} / 42 \pm 2 \text{ \% HR})}, \quad (3.19)$$

expresión válida sólo para el sensor TGS 2620 caracterizado. La expresión (3.19) se nota graficada en la Figura 3.3.

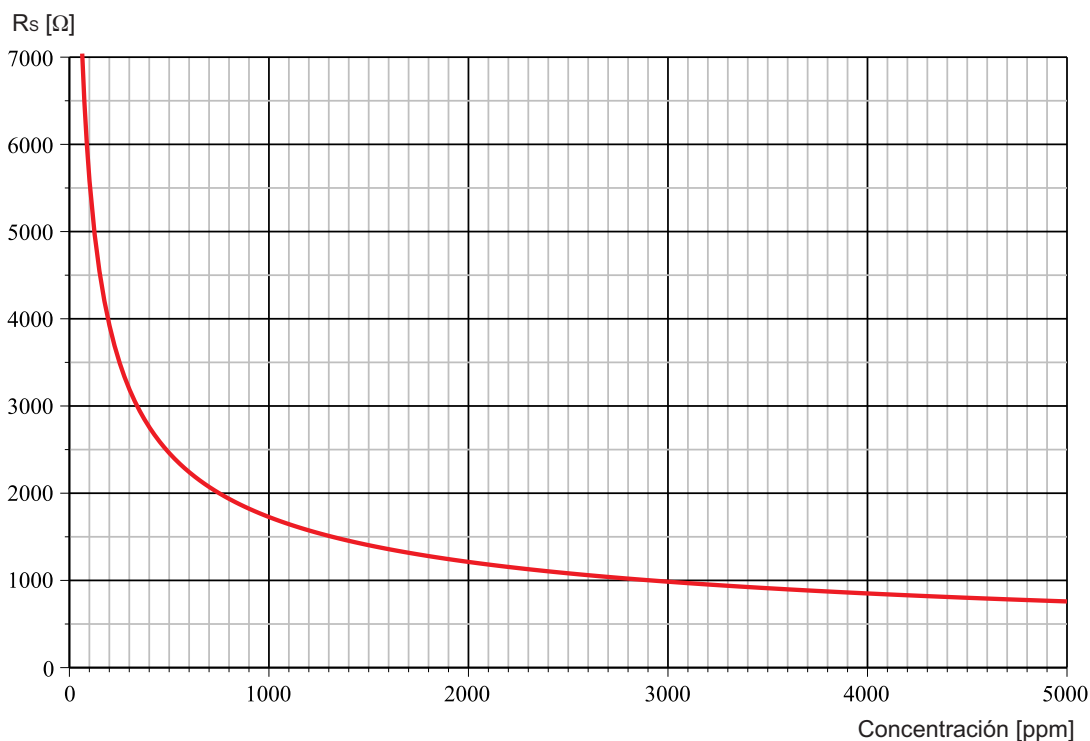


FIGURA 3.3: Curva característica del sensor a emplear según la ecuación (3.19). Se tienen los valores de  $V_C = 5.03$  V y  $R_L = 9,770$   $\Omega$ .

### 3.6. Concentración a partir del voltaje medido

Como se mencionó con anterioridad en la Sección 2.2.4, lo que se mide físicamente es la señal del sensor  $V_L$ , cantidad dada evidentemente en unidades de voltaje [V], no en unidades de concentración [ppm]. Pero ahora que se tiene caracterizado el sensor, dadas las particularidades del proyecto, es preciso obtener la concentración  $C$  a partir de este voltaje medido  $V_L$ . En este punto del proyecto se poseen definidas dos ecuaciones importantes, la (2.1) y (2.2):

$$R_S = KC^{-\alpha} \quad \wedge \quad V_L = \frac{V_C R_L}{R_S + R_L}$$

de las cuales se obtiene:

$$V_L = V_L(C) = \frac{V_C R_L}{KC^{-\alpha} + R_L}. \quad (3.20)$$

Sólo restará despejar  $C$  para obtener:

$$C = C(V_L) = \left[ \left( \frac{V_C}{V_L} - 1 \right) \frac{R_L}{K} \right]^{-1/\alpha} \quad [\text{ppm}]. \quad (3.21)$$

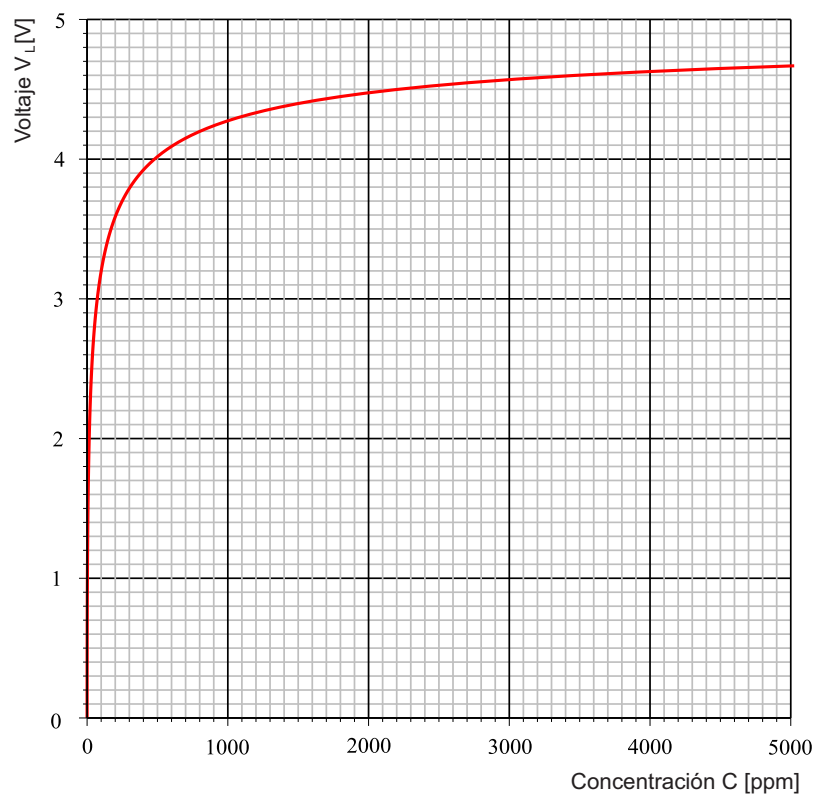
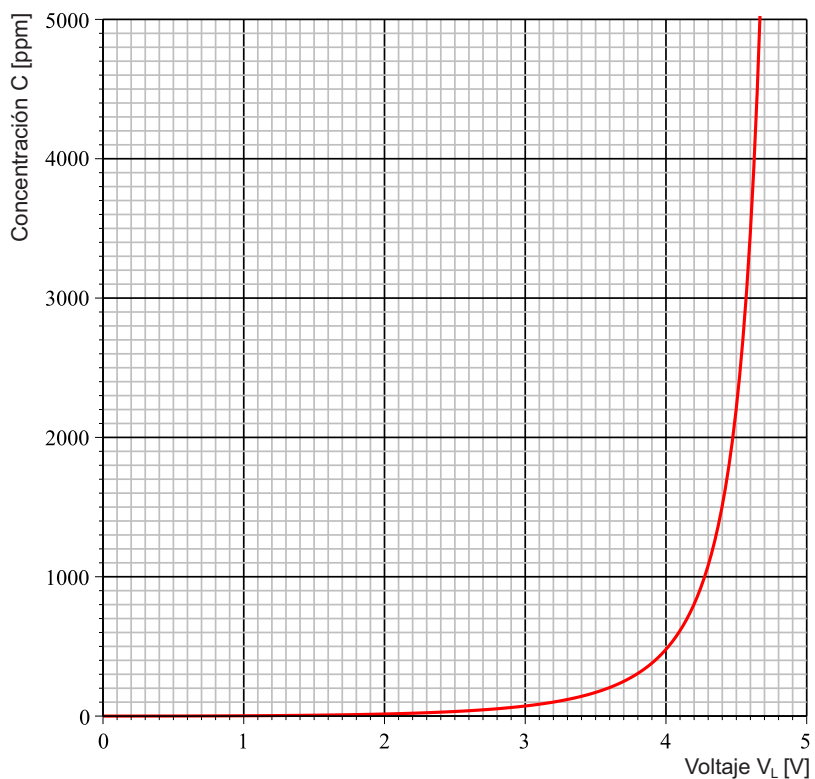


FIGURA 3.4: Curvas del sensor a emplear:  $C = C(V_L)$  y  $V_L = V_L(C)$ .

Es claro que esta expresión requiere conocer los parámetros  $K$  y  $\alpha$ , obtenidos de la caracterización del TGS, pero una vez hallados, el cálculo de la concentración  $C$  sólo se remitirá a la medición del voltaje  $V_L$ . Entonces para este proyecto, a temperatura de  $20 \pm 1$  °C y humedad relativa del  $42 \pm 2\%$  los valores de caracterización: resistencia de carga  $R_L = 9\,770 \Omega$ , voltaje del divisor  $V_C = 5.03$  V, sensor con  $K = 58.91$  k $\Omega$  y  $\alpha = 0.5110$ ; definirán la expresión:

$$C = 33.65 \left( \frac{5.03}{V_L} - 1 \right)^{-1.9569} \quad [\text{ppm}] \quad (20 \pm 1 \text{ °C} / 42 \pm 2 \% \text{ HR}), \quad (3.22)$$

ecuación graficada junto con (3.20) en la Figura 3.4.

## Referencias

- [1] *Technical Information For TGS 2620*.
- [2] Vázquez García J.; **Valores gasométricos estimados para las principales poblaciones y sitios a mayor altitud en México**; Rev. Inst. Nal. Enf. Resp. Mex.; Volumen 13 - número 1; 2000; página 8.
- [3] Poling E., Prausnitz J.; *Properties of Gases and Liquids*; Quinta Edición; McGraw-Hill; 2001.
- [4] *The PubChem Project. USA: National Center for Biotechnology Information*: <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/702?from=summary#section=Critical-Temperature> accesada en Noviembre 2014.
- [5] Smith J., Abbott M.; *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*; Quinta Edición; McGraw-Hill; 1996; Apéndice E.
- [6] Haile J.; *Caution When Using Charts or Tables to Apply the Lee-Kesler Correlation*; [http://www.macatea.com/wshop/articles/LK\\_caution.php](http://www.macatea.com/wshop/articles/LK_caution.php) accesada en Noviembre 2014.
- [7] Liley E., Thomson H.; *Physical and Chemical Data*; McGraw-Hill; 1999.
- [8] *Hamilton Company*; <https://www.hamiltoncompany.com/item/view/c/138/p/1553/> accesada en Noviembre 2014.

**U**NA vez que se tiene entendido el comportamiento del sensor TGS 2620, sus puntos favorables para sacarle el mayor provecho y asimismo sus puntos críticos para cuidar de ellos, es momento de implementar el Olfato Electrónico en torno a él. El Olfato Electrónico abarcará desde la parte sensorial hasta los aspectos matemáticos necesarios para –según nuestro mejor entender– el tratamiento de datos, pasando por una interfaz cómoda para presentes y futuras renuevas por parte del desarrollador. Este módulo Olfato junto con la Plataforma Robótica de Propósito General, la cual se encargará de la movilidad, comprenden en su totalidad el Sistema Localizador de fuentes de gas de etanol.

#### 4.1. Olfato electrónico

En la literatura especializada la «Nariz Electrónica» u «Olfato Electrónico» se define como un instrumento dotado de sensores químicos y de un programa quimiométrico de reconocimiento de modelos, que es capaz de reconocer y comparar olores individuales o complejos [1]. De forma general, se busca que un olfato electrónico sea no específico y reaccione ante un espectro relativamente grande de compuestos, es decir, no se pretende diseñar al olfato para reconocer algún compuesto concreto sino, por el contrario, cuanto mayor sea el número de compuestos ante los que pueda reaccionar teóricamente mayor será el número de ámbitos de aplicación. Estas ideas se ven claramente expuestas en la Figura 3.1 donde se evidencia que el sensor TGS 2620, al igual que muchos otros sensores, se ha creado para reaccionar ante toda una colección de gases.

Las pruebas presentadas en anteriores y próximos capítulos hacen uso exclusivo del compuesto etanol por su fácil disponibilidad, reactiva inocuidad (véase Sección 2.1) y excelente respuesta del sensor ante su presencia, sin embargo esto no implica que los

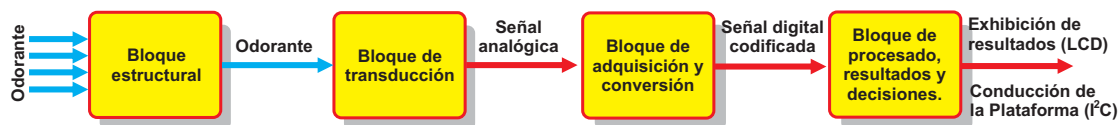


FIGURA 4.1: Diagrama de bloques funcional del Olfato Electrónico.

desarrollos exhibidos en este trabajo no sean aplicables a otro tipo de gases, en la medida que lo permita la parte sensitiva.

Desde un punto de vista funcional el Olfato Electrónico desarrollado está formado fundamentalmente por cuatro bloques bien definidos, referidos en la Figura 4.1:

- Un bloque estructural entendido como «nariz» que encauce de forma efectiva al odorante.
- Un segundo bloque de transducción cuyo elemento fundamental es el de sensor gas TGS 2620.
- Otro bloque de adquisición de señal mediante un divisor de voltaje, junto con un conversor analógico-digital (CAD).
- Y un cuarto bloque de procesado de información, presentación de resultados y toma de decisiones.

## 4.2. Sensores Implementados

Claro está que los sensores son los sentidos con los que el sistema contemplará todo su entorno. Ellos ofrecerán la información necesaria al sistema de procesamiento MCU (*microcontroller unit*) para tomar las decisiones según manda su programación; es por esto la importancia del tipo de sensor, su rango de trabajo, su rapidez y el número empleado de ellos.

El sistema completo Plataforma-Olfato recurre a tres sensores diferentes mostrados en la Figura 4.2. Se trata primeramente del odómetro *encoder* magnético con el cual se obtienen 8,400 pulsos por cada revolución de su eje. Este sensor incorpora un circuito tal que ofrece a su salida pulsos bien definidos con el objeto de ser contados. Ya que este sensor forma parte de la plataforma robótica no se ahondará en él.



FIGURA 4.2: Tres tipos de sensores utilizados por el sistema, de izquierda a derecha: odómetro *encoder*, sensor químico TGS 2620 y telémetro SRF05. Su distribución: por parte del módulo, TGS 2620 y SRF05; por parte de la plataforma, *encoder*.

Seguido, el sensor químico TGS 2620 para el cual se logra obtener información por medio de un divisor de voltaje. Este sensor es la piedra angular del Olfato Electrónico y ha sido ampliamente detallado en los capítulos anteriores. Cabe resaltar que este es el único sensor empleado que por defecto no incorpora algún acondicionamiento electrónico para la señal, sólo integra una resistencia a modo de calefactor que en su ausencia no permitiría fenómeno alguno.

Por último, el sensor tipo telémetro ultrasónico SRF05. Está implementado en el Olfato Electrónico y funge como un ecolocalizador que tiene como fin evitar impactos con posibles obstáculos en su trayectoria. Se trata de un «sensor inteligente» que incorpora un microcontrolador que gestiona la emisión de impulsos de ultrasonidos (40 KHz), que por supuesto son inaudibles para el oído humano. Los impulsos emitidos viajan a la velocidad del sonido hasta alcanzar un objeto, entonces el sonido es reflejado y captado por el receptor de ultrasonidos. Así, lo que hace el microcontrolador incorporado es emitir una ráfaga de impulsos y a continuación empieza a contar el tiempo que tarda en llegar el eco. Este tiempo se traduce en un pulso de eco de anchura proporcional a la distancia a la que se encuentra el objeto. De esta forma se puede calcular la distancia del obstáculo pues se ha obtenido la demora del eco y se sabe de antemano la velocidad del sonido; sin embargo, en este proyecto no es importante conocer la distancia del obstáculo sino simplemente su presencia.

Este sensor presenta la útil opción de ser operado sólo por un hilo, a diferencia de otros sensores de la misma familia como el SRF04 el cual necesariamente requiere de dos hilos para su utilización. Esta cualidad ha sido la que determinó su participación en el Olfato Electrónico pues como se notará más adelante, el número de pines del MCU fue determinante. La gestión de tiempos de operación del SRF05 para cualquier MCU viene representada por la Figura 4.3.

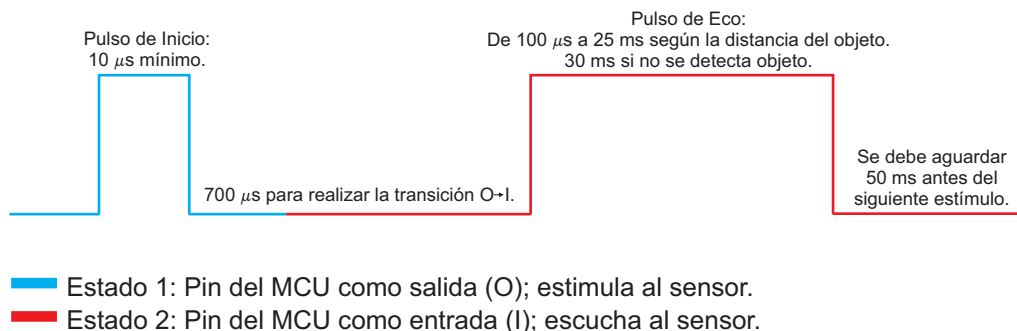


FIGURA 4.3: Diagrama de tiempos para la operación del sensor SRF05 por parte de un MCU.

### 4.3. Microcontrolador y Lenguaje de Programación

Uno de los elementos más importantes del Sistema Localizador es el microcontrolador dado que éste se encarga de la conversión analógico-digital, del procesamiento de dicha información, de su exhibición y conducción de la Plataforma Robótica. Se deberá contemplar a este elemento como el «cerebro» de todo el sistema, y no será para menos. Pero esto comprenderá el aspecto físico, sólo el aspecto de hardware. Una vez elegido el microcontrolador idóneo se deberá hallar el lenguaje de programación el cual, como se comprende bien, será el conducto para plasmar en el MCU todos los algoritmos de operación que se crean pertinentes. Ergo, es necesario definir el «cerebro» adecuado según las necesidades, gustos y experiencias; junto con el medio para poder comunicar todas esas ideas que en su momento se noten con posibilidades.

#### 4.3.1. Microcontrolador

Existe una gran variedad de microcontroladores (MCU) en el mercado, siendo los PIC de *Microchip* los líderes. Esto debido a la fiabilidad y variedad de sus productos, extensa documentación y precios competitivos. Dentro de los PIC la arquitectura de 8 bits es la más popular citándose las familias 10F, 12F, 16F y 18F. Y he aquí la cuestión: debido a las características del proyecto, la familia 16F y 18F satisfacen los requerimientos, ¿pero por cuál decantarse? Se presentan algunos conceptos críticos.

##### 4.3.1.1. Memorias del PIC: de programa y de datos

..... **RAM**

La memoria RAM es una memoria de tipo volátil de lectura y escritura. Hay dos variantes: la estática (SRAM) y la dinámica (DRAM). En la SRAM la información almacenada permanece estable indefinidamente mientras no se suprima la tensión de alimentación. Eso las diferencia de las DRAM que requieren un refrescamiento periódico

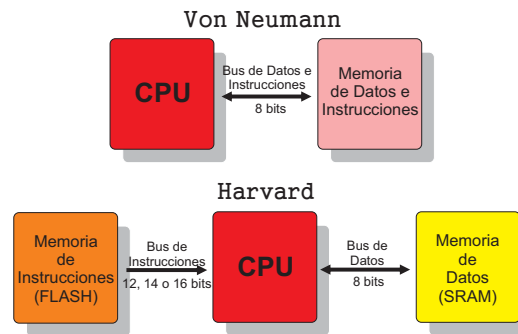


FIGURA 4.4: En la arquitectura Von Neumann se conecta el CPU con una memoria única donde se almacenan datos e instrucciones, compartiendo el mismo bus. La arquitectura Harvard maneja la memoria de datos y la memoria de instrucciones por separado y con diferentes capacidades.

de la información almacenada. Las DRAM se usan profusamente en los ordenadores personales ya que son más densas y aceptan mayor capacidad de datos. La memoria SRAM es más cara, pero más rápida y con un menor consumo, debido a esto los microcontroladores hacen uso exclusivo de ella.

Todos los registros de datos del PIC son contenidos en la memoria SRAM y son conocidos como RFM (*Register File Map*). A su vez, estos registros se ven divididos en los registros de propósito específico SFR (*Special Function Registers*) y los de propósito general GPR (*General Purpose Registers*).

..... **FLASH**

En sus posiciones contiene el programa con las instrucciones que gobiernan la aplicación. Es del tipo no volátil, es decir, el programa se mantiene aunque desaparezca la alimentación. La memoria se puede borrar y escribir un número finito, aunque muy grande, de veces (del orden de  $10^5$ ).

Es frecuente denotar la capacidad de la memoria FLASH en «palabras», para lo cual es necesario conocer el «tamaño de la palabra». Para evitar confusiones es necesario remarcar algunos puntos. Las familias PIC 10F, 12F, 16F y 18F son llamados microcontroladores de 8 bits ya que todos ellos tienen un **bus de datos** de 8 bits, como lo representa la Figura 4.4. Además, gracias a la arquitectura Harvard, la **longitud (de palabra) de las instrucciones** para cada familia de los PIC de 8 bits varía entre 12, 14 y 16 bits.

En el lenguaje máquina, cada instrucción de un programa está formada por un grupo de dígitos binarios conocido como «palabra». El tamaño o longitud de una palabra hace referencia al número de bits contenidos en ella. Por ejemplo, si se menciona que se tiene 6 k de memoria para programa (6,144 bytes = 49,142 bits), entonces para un PIC

Arquitectura	Línea Base	Gama Media	Gama Media mejorada	Gama mejorada
Pines	6-40	8-64	8-64	18-100
Interrupciones	No	Sí	Sí	Sí, priorizadas
Desempeño	5 MIPS	5 MIPS	8 MIPS	Hasta 16 MIPS
Instrucciones	33, 12-bit	35, 14-bit	49, 14-bit	83, 16-bit
Memoria de programa	Hasta 3 kbytes	Hasta 14 kbytes	Hasta 28 kbytes	Hasta 128 kbytes
Memoria de datos	Hasta 138 bytes	Hasta 368 bytes	Hasta 1.5 kB	Hasta 4 kB
Pila	2 niveles	8 niveles	16 niveles	32 niveles
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓Comparador</li> <li>✓8-bit CAD</li> <li>✓Oscilador Interno</li> </ul>	En adición a la gama anterior <ul style="list-style-type: none"> <li>✓SPI/I<sup>2</sup>C</li> <li>✓UART</li> <li>✓PWM</li> <li>✓LCD</li> <li>✓10-bit CAD</li> <li>✓OpAmp</li> </ul>	En adición a la gama anterior <ul style="list-style-type: none"> <li>✓Multiple comunicación</li> <li>✓PWM independientes del tiempo base</li> </ul>	En adición a la gama anterior <ul style="list-style-type: none"> <li>✓8×8 multiplicador</li> <li>✓CAN</li> <li>✓USB</li> <li>✓12-bit CAD</li> </ul>
Cualidades	Bajo costo y tamaño reducido	Desempeño y costo óptimos	Costo efectivo con mayor desempeño	Alto desempeño, optimizado para C
Total de dispositivos	16	58	29	193
Familias	PIC 10, 12, 16	PIC 12, 16	PIC 12FXXX, 16F1XX	PIC 18

TABLA 4.1: Comparación de arquitecturas de MCU PIC de 8-bits [2].

de 12 bits de longitud de palabra esto significará 4,096 palabras de capacidad de memoria de programa, de memoria FLASH; mientras que para uno de 16 bits se traducirá en 3,072 palabras.

#### .....EEPROM

Hasta aquí ya se han identificado dos de los tres tipos de memoria que poseen los PIC actuales: la de datos que es tipo SRAM y la de instrucciones que es de tipo FLASH. El tercer tipo de memoria es, evidentemente, la EEPROM que es accesible por el usuario mediante programación. Es una pequeña área de memoria de datos de lectura y escritura no volátil, gracias a la cual, un corte del suministro de alimentación no ocasiona la pérdida de la información, que estará disponible al reinicializarse el programa.

#### 4.3.1.2. Instrucciones máquina, Ciclo de reloj, MIPS

En los PIC un ciclo de instrucción equivale a 4 ciclos de reloj, salvo en los saltos de doble tiempo (`goto`, `call`, `return`, etc.). Por lo tanto, si se tiene un reloj de 20 MHz, un ciclo de instrucción será de

$$T = 4 \text{ veces el tiempo de un ciclo de reloj} = 4 \left( \frac{1}{20 \text{ MHz}} \right) = 200 \text{ ns.}$$

Si se tiene un cristal de 4 MHz el tiempo de instrucción será de

$$T = 4 \text{ veces el tiempo de un ciclo de reloj} = 4 \left( \frac{1}{4 \text{ MHz}} \right) = 1 \mu\text{s}.$$

Para las MIPS (Millones de Instrucciones Por Segundo) se tendrá

$$20 \text{ MHz} \longrightarrow \frac{\frac{1}{200 \text{ ns}}}{1,000,000} = \frac{5,000,000}{1,000,000} = 5 \text{ MIPS},$$

los cuales son los MIPS máximos para un PIC que trabaje con 20 MHz como máximo. Así para 4 MHz se tendrá un PIC trabajando a 1 MIPS.

Deberá entenderse que estos valores de MIPS son las instrucciones como máximas a las que trabajará el microcontrolador con dicho cristal. Es claro que este número se verá disminuido si por ejemplo se tiene diversas instrucciones de doble tiempo.

A continuación se realiza una comparativa para tener claro el panorama de los microcontroladores ofrecidos por *Microchip*. Para ser concretos, se presentan las características relevantes de los PIC más representativos de las gamas media y mejorada: el PIC 16F886 y el PIC 18F2550 [2], ambos con 28 pines.

..... **PIC 16F886**

1. Velocidad de CPU (MIPS): 5
2. Memoria de programa tipo FLASH:

$$\mathbf{8k \text{ de palabras}} \rightarrow 8,192 \text{ palabras} = \mathbf{8,192 \times 14 \text{ bits}} = 114,688 \text{ bits} = 14,336 \text{ bytes} \rightarrow \mathbf{14 \text{ kB}}$$

Estas palabras están distribuidas en **4 páginas**: PAGE 0 (0005h-07FFh), PAGE 1 (0800h-0FFFh), PAGE 2 (1000h-17FF) y PAGE 3 (1800h-1FFFh).

3. Memoria de datos:
  - Memoria SRAM: 368 bytes GPR.  
Aquí van todas las variables definidas por el usuario (368 bytes = 368 variables) distribuidas en **4 bancos**. También los registros «naturales» del PIC (SFR) son incluidos en la SRAM, pero sin consumir de los 368 bytes.
  - Memoria EEPROM: 256 bytes.
4. Precio relativo: 1

..... **PIC 18F2550**

1. Velocidad de CPU (MIPS): 12

## 2. Memoria de programa tipo FLASH:

**16k de palabras** → 16,384 palabras = **16,384×16 bits** = 262,144 bits = 32,768 bytes → **32 kB**

## 3. Memoria de datos:

- Memoria SRAM: 2,048 bytes
- Memoria EEPROM: 256 bytes

## 4. Precio relativo: 2.1

.....

Así, aunque en prestaciones el PIC 18F es superior al PIC 16F, **se ha elegido al de gama media**. Esto debido principalmente a su costo y popularidad; de esta manera es posible en el desarrollo del proyecto hacer uso de varias unidades haciendo uso de la comodidad del precio y disponibilidad. Es justo mencionar que nuestra experiencia sobre la gama baja y media asegura un desarrollo e implementación del algoritmo localizador aún más raudo que si se empleará un 18F, pues se conocen bien a estos pequeños integrados de 12 y 14 bits; es seguro que la falta de práctica sobre los 18F causará diversos contratiempos los cuales no se está en la comodidad de padecer. Para finalizar, si se requiriera programar en ASM, desde nuestro particular sentir es más atractivo programar con 35 instrucciones que con 83.

### 4.3.2. Lenguaje de Programación

Un programa escrito en ensamblador o cualquier lenguaje, no se puede ejecutar directamente por el microcontrolador; es necesario «traducirlo» al lenguaje máquina. Este proceso se denomina «ensamblaje» y lo realiza un programa llamado «ensamblador». El programa original escrito en ensamblador o en cualquier otro lenguaje se denomina «programa fuente» y el resultado del ensamblaje es el «programa objeto», comúnmente un archivo con extensión *.hex*.

Para generar el archivo *.hex* conteniendo al programa objeto y que se ha de grabar en el PIC, existen gran variedad de alternativas, esto es, diversos IDE (*Integrated Development Environment*), compiladores y ensambladores dispuestos para dicho fin. En la actualidad es común que los software destinados para programar microcontroladores posean la paquetería completa: IDE, compilador y ensamblador.

Como es típico en los lenguajes de programación, su elección recaerá principalmente en el gusto y objetivos del programador. Así, se tienen opciones como ASM, C, BASIC y PASCAL, todos con sus respectivas ventajas y desventajas.

En nuestra línea personal de trabajo, la programación de microcontroladores siempre había sido efectuada en código ASM mediante el IDE oficial de *Microchip*, el MPLAB, tan es así que la Plataforma Robótica fue programada enteramente en este formato. Sin embargo ahora, dado que se pretenden utilizar –entre otras cosas– una LCD, un teclado y el protocolo I<sup>2</sup>C para la conducción de la plataforma, resulta un tanto incómodo e inflexible programar en ASM razón por la que se ha elegido utilizar un lenguaje de alto nivel. Y si no importara lo anterior, la posibilidad de implementar un algoritmo matemático dentro del PIC para hallar la fuga de gas hace esta la mejor de las elecciones.

Por la claridad y facilidad de lectura del código, aunado al disgusto a C, se ha escogido BASIC. Como es común en lenguajes populares, existen diversos compiladores para elegir, los principales: MikroBASIC, PIC BASIC PRO y Proton. Aquí sus características:

..... **Proton**

- ✓ Estable.
- ✓ Código ASM generado de gran calidad.
- ✓ Todo tipo de datos (enteros, flotantes, bytes, etc.)
- ✓ Funciones especializadas (GLCD, LCD, I<sup>2</sup>C, USB, etc.)
- ✓ IDE integrado.
- ✓ Interfaz para simulación en Proteus.
- ✓ Integración a MPLAB.
- ✗ Sin procedimientos ni funciones.
- ✗ Todas las variables son globales.

..... **PIC BASIC PRO**

- ✓ Estable.
- ✓ Código ASM generado de gran calidad.
- ✓ Funciones especializadas (GLCD, LCD, I<sup>2</sup>C, USB, etc.)
- ✓ Interfaz para simulación en Proteus.
- ✓ Integración a MPLAB.

- ✓ Abundante literatura.
- ✗ Sin procedimientos ni funciones.
- ✗ Todas las variables son globales.
- ✗ Sin datos tipo flotantes.
- ✗ Sin IDE. Debe usarse un IDE externo (MicroCode Studio o MPLAB).

..... **MikroBASIC**

- ✓ Estable
- ✓ Todo tipo de datos (Int, Float, byte, etc.).
- ✓ Compilador estructurado (Procedimientos y Funciones).
- ✓ Variables locales.
- ✓ Funciones especializadas (GLCD, LCD, I<sup>2</sup>C, USB, etc.).
- ✓ IDE integrado.
- ✓ Módulo de simulación.
- ✓ Versión gratuita con limitación de memoria de programa (2k).
- ✗ Sin interfaz para simulación en Proteus.
- ✗ Sin integración a MPLAB.
- ✗ IDE inestable.
- ✗ Código ASM parcial.

.....

**Se ha elegido a MikroBASIC** principalmente porque presenta el mayor número de librerías lo que se traduce en facilidad a la hora de programar. Es preciso mencionar que este compilador presenta la mayor gama de PIC en su repertorio. Además, se agradece en sobremanera su versión gratuita con toda la capacidad del programa de pago, excepto en la cantidad de código.

Si bien es cierto que PIC BASIC PRO tiene respecto a sus competidores la mayor literatura y referencias en la red –lo cual es importante–, es también cierto que su código es fácilmente exportable a MikroBASIC, con sus pequeñas modificaciones; después de todo ambos son BASIC. Una comparación más detallada entre estos tres compiladores BASIC se encontrará en *Migration Path Document: mikroBasic vs PICBasic Pro* [3].

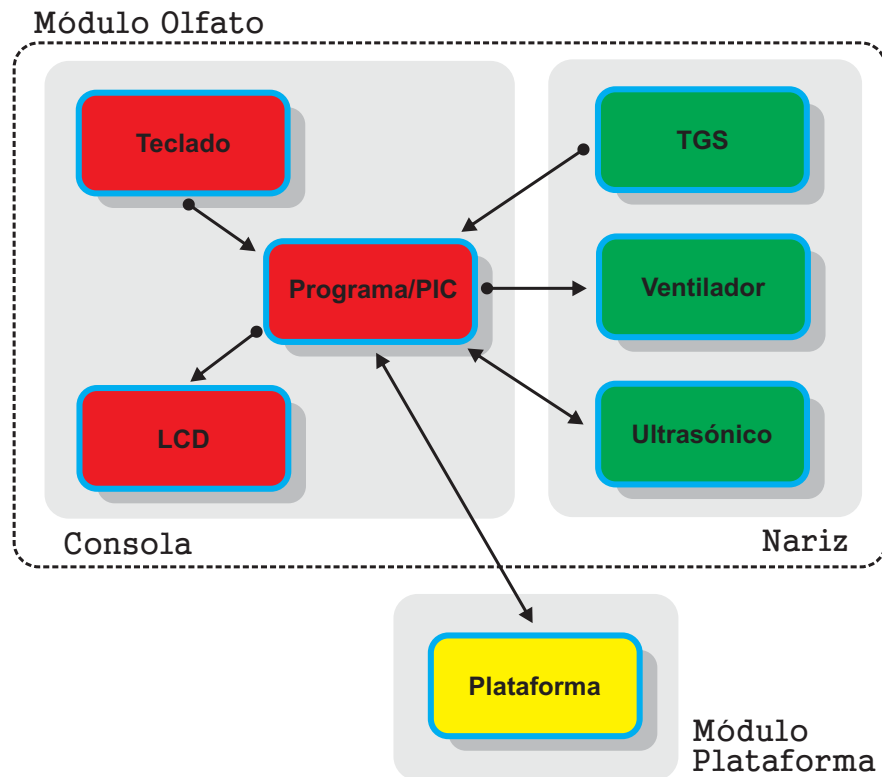


FIGURA 4.5: Módulos del Sistema Localizador: Plataforma Robótica y Olfato Electrónico; a su vez el módulo Olfato se subdivide en la Consola y Nariz.

## 4.4. Elementos del Olfato Electrónico

El módulo Olfato Electrónico está dividido en dos elementos principales: la consola de operación y la estructura que funge como nariz. Este par de bloques interconectados electrónicamente forman el módulo que será montado en la Plataforma Robótica; éstos se encargarán de la detección del gas, procesamiento de la información y por último, de la conducción de la plataforma.

### 4.4.1. Consola

La consola es el dispositivo comprendido en el módulo Olfato encargado de recibir, procesar y exhibir las señales de los sensores, conducir la plataforma robótica y atender las instrucciones del desarrollador, todo de forma simultánea. Su diagrama electrónico se muestra en la Figura 4.6 y su aspecto físico final en la Figura 4.7.

Se trata de un dispositivo que aloja al microcontrolador 16F886 cómodamente en un zócalo ZIF (*Zero Insertion Force*) junto con toda su circuitería de soporte. La consola trabaja bajo una lógica y alimentación de 5 V obtenidos de la Plataforma Robótica,

además, debido al control de los ventiladores se hace necesaria la presencia de un voltaje de 12 V, también obtenidos de la plataforma.

La consola proporciona tres interfaces para la gestión de tres narices, esto es, tres circuitos divisores de voltaje para tres sensores TGS 2620 con sus sendos CAD, tres circuitos de transistores trabajando en corte-saturación para el control de tres ventiladores gestionados por el MCU y, tres interfaces conectadas directamente al voltaje  $V_L$  de cada TGS con el fin de conectar un multímetro con la capacidad de transferir sus lecturas a un ordenador; esto último permite obtener lecturas de los sensores en un computador en tiempo real para su posterior análisis. En **el diseño final del Sistema Localizador se implementa sólo una nariz** es por ello que en la Figura 4.6 aparecen atenuados los componentes de las otras dos narices, que mas sin embargo, también fueron simuladas e implementadas físicamente para lograr determinar posibles configuraciones y caminos a explorar.

La consola incluye también un teclado 4×6 tipo telefónico y una LCD 2×24 con el popular controlador Hitachi. Deberá entenderse que el teclado y la LCD son un auxiliar para el desarrollo del Algoritmo Localizador de Fugas; con ellos se permite la retroalimentación entre en sistema y el usuario programador.

Es también deber de la consola, mediante el MCU, la comunicación I<sup>2</sup>C hacia la plataforma: el módulo posee el papel de Maestro y la plataforma de Esclavo. Se incorpora una interfaz telefónica RJ45 suficiente para soportar los cuatro hilos necesarios por el protocolo I<sup>2</sup>C: dos de alimentación (+5V y GND) y dos de comunicación (SDA y SCL). Uno de los beneficios de utilizar este protocolo de comunicación, mediante el cual la plataforma es conducida, es la fácil implementación de los llamados «sensores inteligentes» que incorporan el I<sup>2</sup>C, esto utilizando el mismo puerto RJ45 de forma simultánea con la plataforma. Se debe recordar que sobre el bus I<sup>2</sup>C se pueden «montar» hasta 40 dispositivos esclavos, siendo ciertamente uno de ellos la Plataforma Robótica I<sup>2</sup>C que funge como un periférico de los 40 soportables.

La consola ha sido diseñada para la fácil extracción de elementos, así la LCD es sustraída simplemente con separar una tira de pines; así también el teclado. El PIC se extrae con tan solo presionar la palanca del zócalo ZIF (muy útil dado la constante programación de éste), los componentes electrónicos de las narices son conectadas con las prácticas terminales *molex* y la plataforma es comunicada por un típico cable telefónico. La interfaz para el multímetro consta simplemente de un *jack* invertido. De esta forma se ha buscado que la conexión-desconexión de elementos en la consola sea un aspecto trivial.

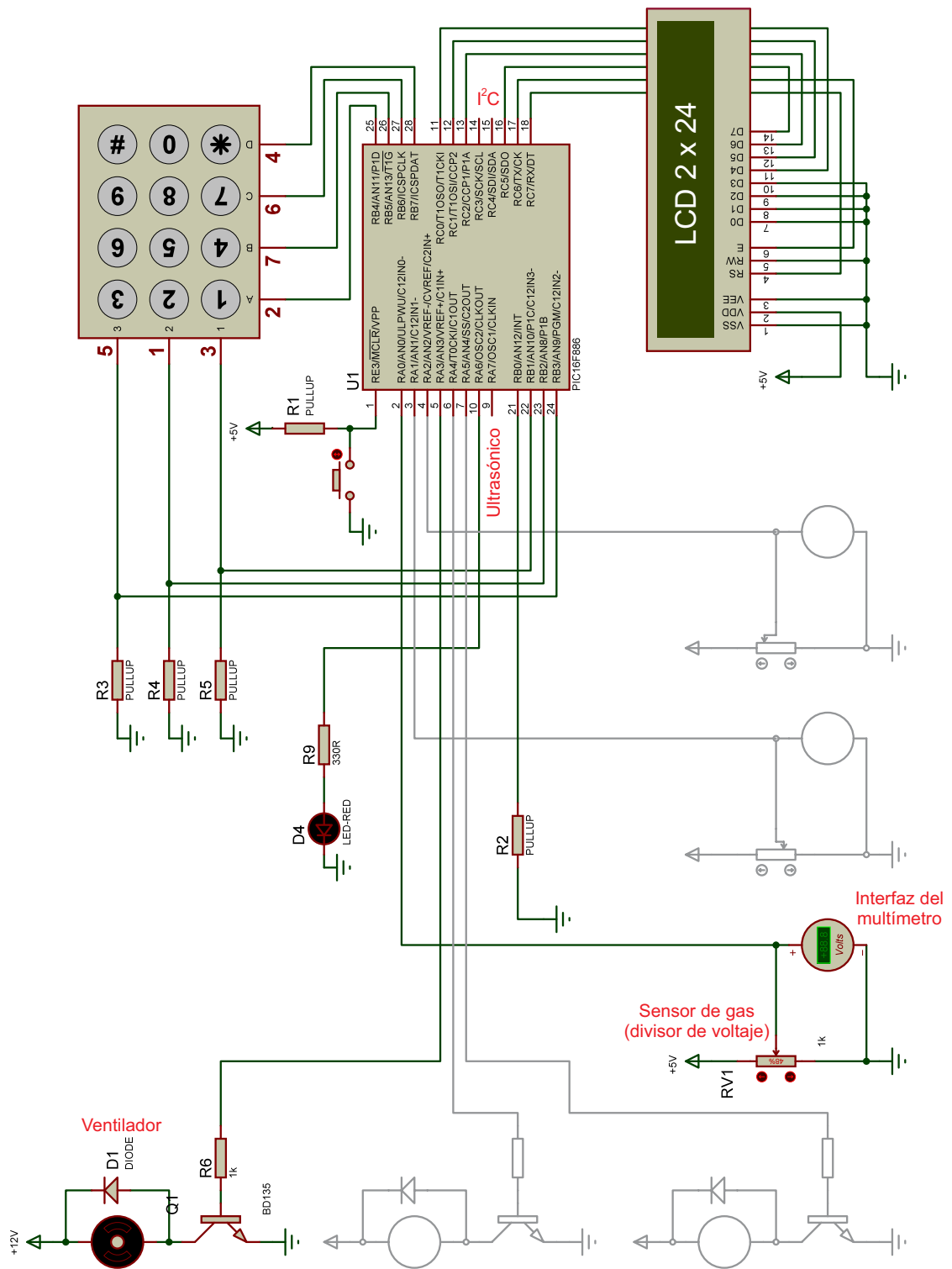


FIGURA 4.6: Esquema electrónico completo del módulo Olfato, se incluye la circuitería de la consola y los elementos electrónicos de las tres posibles narices. Este circuito fue simulado en su totalidad por medio de Proteus. El circuito fue diseñado y construido con capacidad para tres sensores TGS con sendos ventiladores formando así tres narices, aunque para el diseño del sistema final sólo se empleo una nariz.



FIGURA 4.7: Consola de operación. Se distinguen dos elementos retroactivos imprescindibles en el desarrollo del proyecto: teclado y LCD. Nótese las tres terminales *molex* como interfaces para las tres narices que es capaz de soportar la consola.

#### 4.4.2. Nariz

Ya que el vapor de etanol es más pesado que el aire (46.06 g/mol contra 28.97 g/mol) tiende a mantenerse cerca del suelo. Esta consideración es notada en el robot de Trincavelli *et al.* [4] fijando su nariz electrónica a 10 cm del suelo; Marques *et al.* [5] lo demuestra con su robot localizador utilizando información en tres dimensiones. Con estos datos y experiencias se concluye conveniente coleccionar todo flujo lo más cercano al suelo.

Se construyeron tres estructuras (narices) idénticas, montando sus respectivos sensores TGS 2620 y ventiladores. Sin embargo con el estudio de los resultados de las tres narices se hizo patente la suficiencia de una sola Nariz solventando la ausencia de sensores con el movimiento sistemático de la plataforma. Los componentes estructurales y electrónicos de la Nariz, como lo evidencia la Figura 4.8, son:

- (1) Sensor ultrasónico SRF05.
- (2) Reductor PVC de 4" a 2".



FIGURA 4.8: Elementos de la Nariz.

- (3) Tubo PVC 2" de 5 cm.
- (4) Codo a 90° PVC 2".
- (5) Embudo 2" obtenido de boca de botella estándar 600 mL.
- (6) Tubo PVC 2" de 10 cm.
- (7) Sensor TGS 2620.
- (8) Ventilador axial de 2" a 12 V, 130 mA, 1.56 W, 6500 rpm.

Se diseñó la estructura de la Nariz de tal forma que funcionará como un sistema de colecta (2) y conducción de aire limpio o aire con odorante hacia el sensor TGS (7), canalizado con el embudo de botella (5). Se presenta también para este fin en la parte final del arreglo un ventilador (8) concebido para producir una corriente de aire. El sensor TGS 2620 (7) se encuentra cubierto por una tira delgada de hule espuma con el objeto de disminuir los cambios de temperatura que la corriente de aire generada dentro del tubo pueda provocar. El sensor ultrasónico (1) se ubica justo en la punta de la nariz con la responsabilidad total de evitar colisiones y desestimar posibles caminos

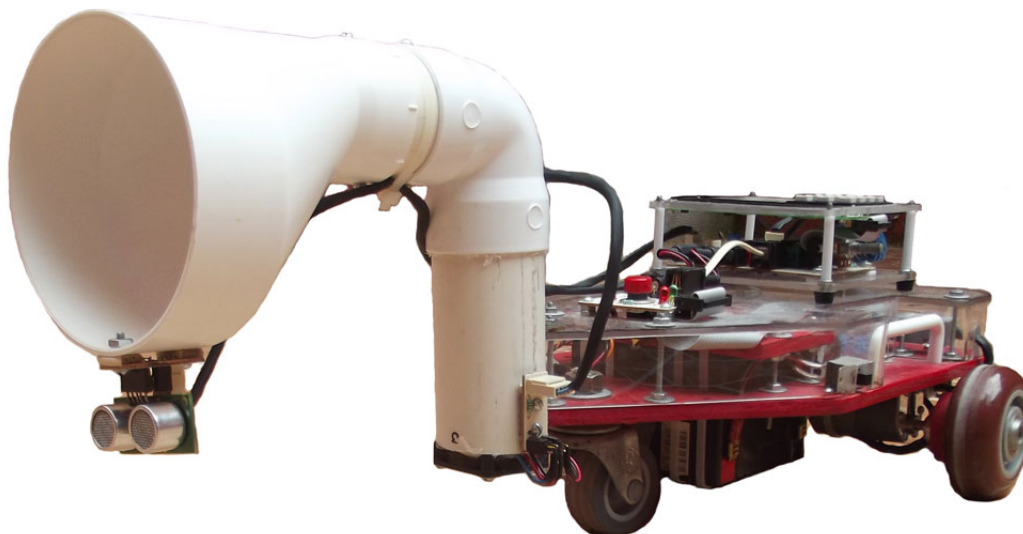


FIGURA 4.9: Sistema Localizador completo. Se nota el sensor SRF05 anclado a la Nariz y al fondo la consola de operación, ellos montados en la Plataforma Robótica.

en la localización. Se eligió la forma en «le invertida →» para asegurar que el odorante sólo se introdujera por el reductor (2) y evitar en todo lo posible la entrada a través del ventilador (8). Además, con esta configuración el reductor (2) se halla a excelente altura según lo comentado con anterioridad. La Figura 4.9 muestra al Sistema Localizador completo y armado, listo para cualquier serie de pruebas. El sistema está comprendido de dos módulos: la Plataforma Robótica y el Olfato Electrónico.

## 4.5. Localización de Fugas de Gas

La consola tiene programado tres modos independientes de operación visualizados en la Figura 4.10. El primero es el **Modo Manual**, donde se pueden visualizar hasta tres lecturas  $V_L$  de los tres posibles sensores TGS, además de gestionar independientemente la operación de los ventiladores. El segundo, el **Modo Espera**, consiste en una cuenta regresiva de 5 minutos con el ventilador activado y con la visualización del voltaje  $V_L$  del canal número 1, que corresponde al sensor TGS de la nariz empleada. Este modo permite el tiempo mínimo para estabilizar al sensor antes de la localización. Al finalizar la cuenta regresiva de 5 minutos pasa automáticamente al último modo por mencionar, el **Modo Automático**. En este modo, de encontrarse bloqueada la Plataforma Robótica, solicita al usuario el desbloqueo; de estar liberada la plataforma entonces ejecuta el **Algoritmo de Localización de Fugas de Gas** que a continuación se detalla.

El voltaje  $V_L$  ofrecido por el sensor y por la resistencia de carga son manipulados sólo por la función definida y nombrada como **ESTADOS(punto, tiempo)**, donde el argumento **punto**, que puede correr desde 0 hasta 255, se refiere cada una de las posiciones donde se halle la plataforma. El argumento **tiempo** corre desde 1 a 255 y se refiere al

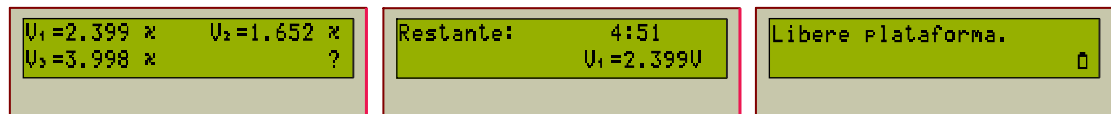


FIGURA 4.10: Tres modos de operación, de izquierda a derecha: Modo Manual, Modo Espera y Modo Automático.

total de mediciones por realizar espaciadas por un segundo. Se presenta el fragmento de programa definiendo la función ESTADOS:

```

sub procedure ESTADOS (dim punto, tiempo as byte)
    vdelay_ms(1000)
    mayor = 0
    menor = 5000

    for n = 0 to (tiempo - 1)
        vdelay_ms(1000)

        adc_rd = ADC_Read(0)
        dato = adc_rd * 5000
        dato = dato/1023

        if mayor < dato then
            mayor = dato
            my = n
        end if

        if menor > dato then
            menor = dato
            mn = n
        end if

    next n

    if mn => my then
        VP[punto] = 0
    else
        VP[punto] = mayor - menor
    end if

end sub

```

Como se ve, la función ESTADOS otorga como salida un valor llamado VP[punto] [mV] el cual representa un voltaje asignado a la posición punto durante el lapso tiempo, los dos argumentos de la función. Si fijamos una posición, por ejemplo, para punto=0, la función ESTADOS simplemente localiza los puntos extremos (máximo y mínimo global)

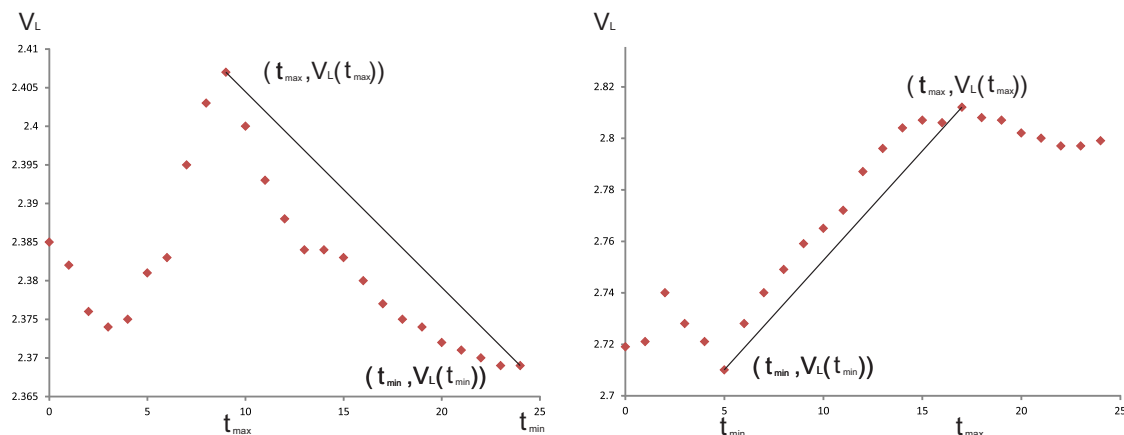


FIGURA 4.11: Dos típicas gráficas de la función discreta  $V_L = V_L(t)$  correspondientes a dos posiciones de lectura con 25 capturas cada una. Para la primera gráfica evidentemente  $m < 0$ , para la segunda  $m > 0$ .

de la función discreta  $V_L = V_L(t)$  con  $t$  corriendo desde 1 hasta tiempo:

$$\text{Máximo} = (t_{max}, V_L(t_{max})) \quad \text{y} \quad \text{Mínimo} = (t_{min}, V_L(t_{min}))$$

para sucesivamente hallar el signo de la pendiente  $m$  entre estos dos puntos:

$$m = \frac{V_L(t_{max}) - V_L(t_{min})}{t_{max} - t_{min}}.$$

Dado que  $V_L(t_{max}) - V_L(t_{min}) > 0$  pues es el valor máximo menos el valor mínimo, entonces sólo bastará con saber la relación entre  $t_{max}$  y  $t_{min}$ :

$$\text{Si } t_{max} < t_{min} \quad \Rightarrow \quad m < 0 \quad \text{asignando} \quad VP[0] = 0,$$

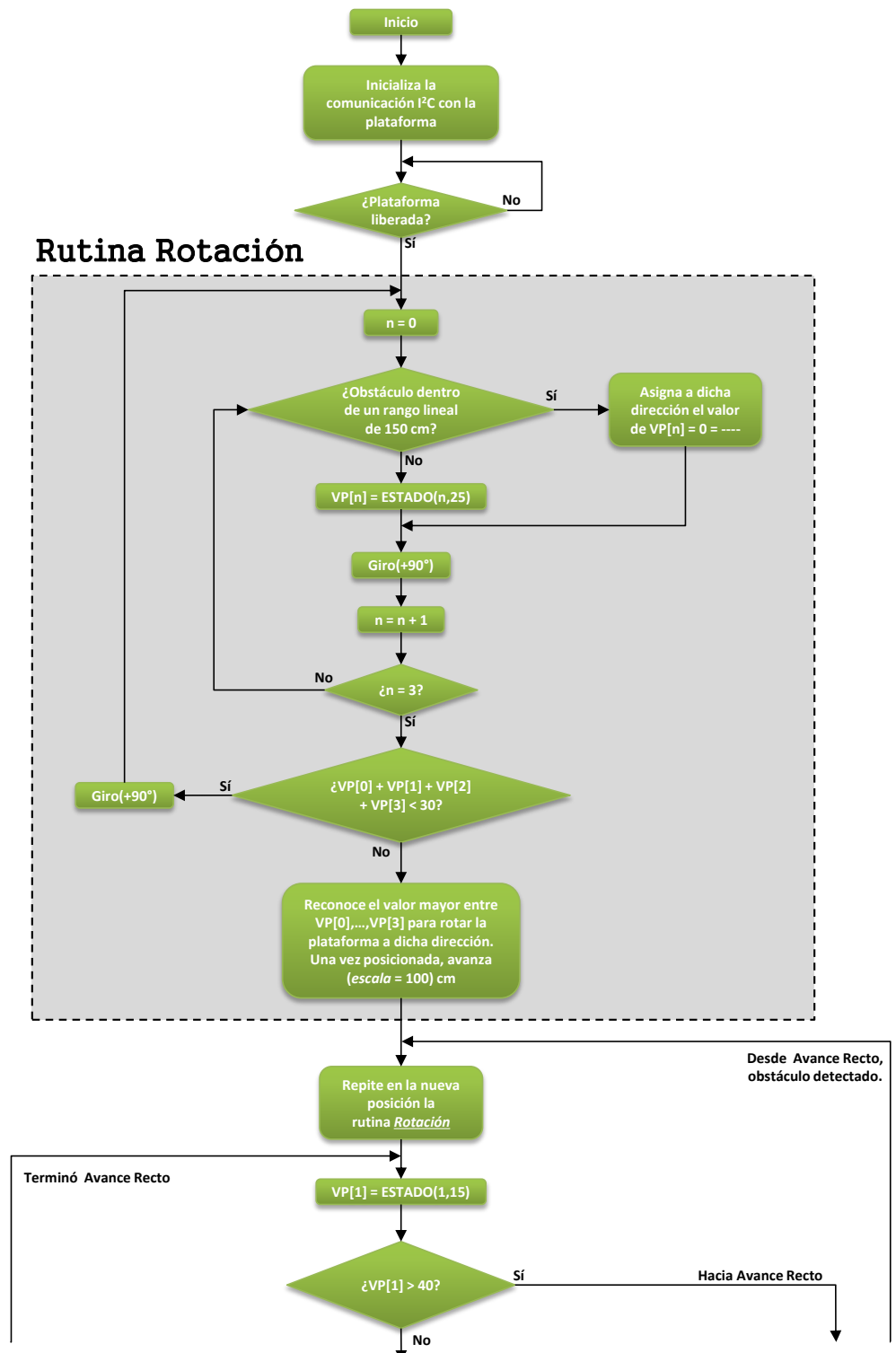
$$\text{Si } t_{max} > t_{min} \quad \Rightarrow \quad m > 0 \quad \text{asignando} \quad VP[0] = V_L(t_{max}) - V_L(t_{min}).$$

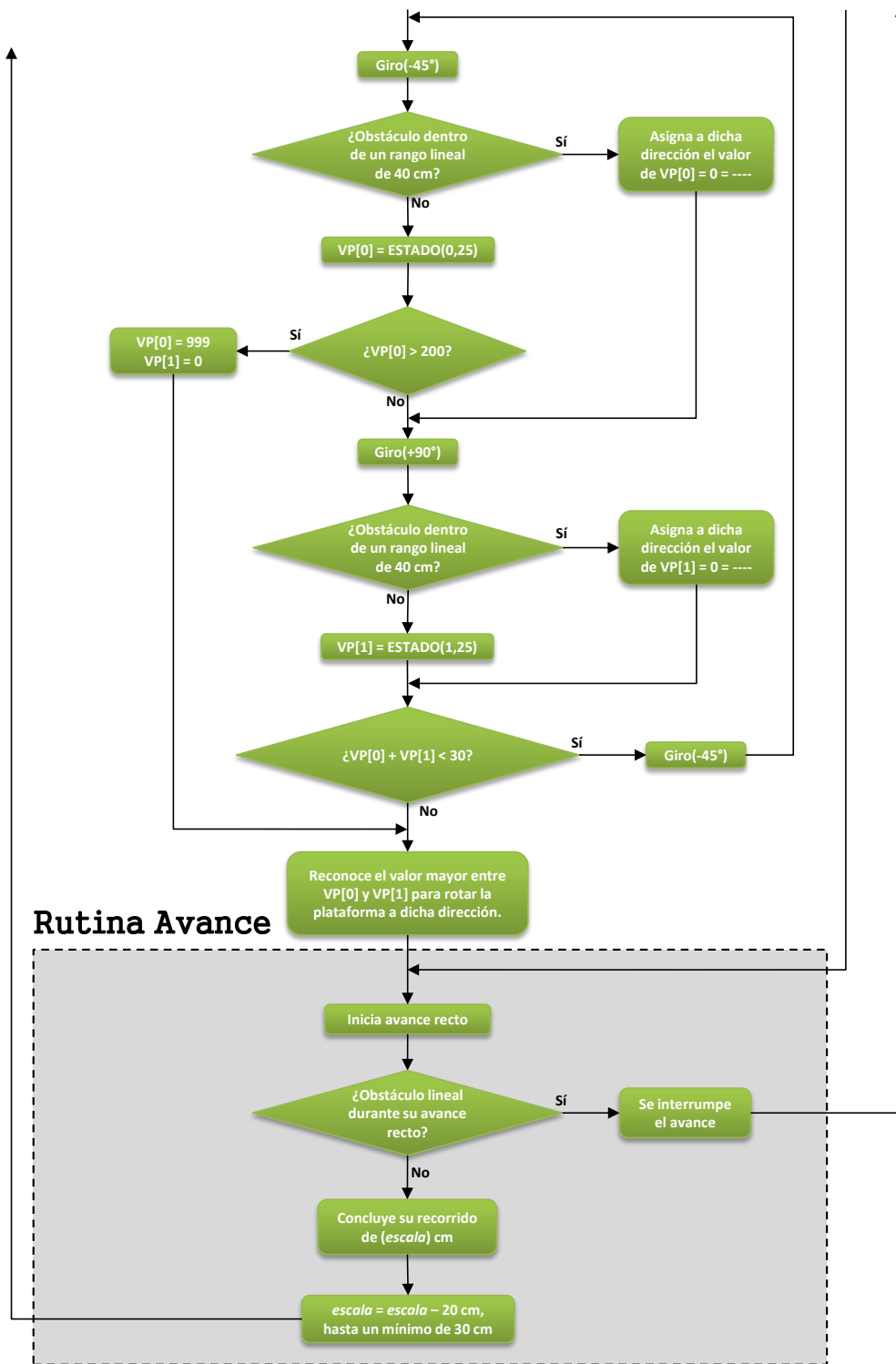
Ahora, este procedimiento el MCU lo realiza sólo para la posición `punto=0` obteniéndose `VP[0]`, pero `punto` puede variar de 0 a 255 obteniéndose de `VP[0]` a `VP[255]`. Como se nota en el algoritmo presentado más adelante, para la localización de la fuga sólo se hacen necesarias como máximo cuatro posiciones, así `punto` corre en el programa sólo de 0 a 3.

Resumiendo: la plataforma se posará en la posición `punto` por un tiempo dado por `tiempo`, antes de moverse a otra posición. Para esa posición y para ese tiempo se tendrá asociado el valor `VP[punto]`. Sólo restará comparar los valores de los `VP[punto]` según lo muestra el siguiente algoritmo para poder determinar un camino con alto potencial. Este es el Algoritmo Localizador de Fugas de Gas al cual el Sistema Localizador debe toda su operación de rastreo.

### 4.5.1. Algoritmo Localizador de Fugas

Se presenta ahora el algoritmo del Modo Automático, el modo de localización de fugas de gas:





Como ejemplo concreto, se presenta en la Figura 4.13 cuatro resultados de la rutina *Rotación* presentada en el Algoritmo de Localización. Después de realizar el análisis de las cuatro ubicaciones se ofrece por la LCD la siguiente información:  $VP[0]=----$ ,  $VP[1]=0127$ ,  $VP[2]=0000$  y  $VP[3]=0045$ . Para la primera lectura se presentó un obstáculo dentro de una distancia lineal de 150 cm por ello no existió captura de datos, para

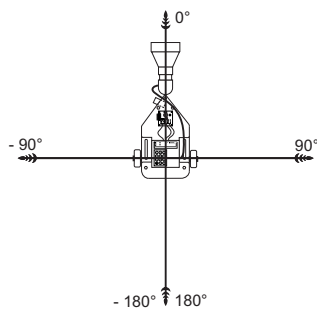


FIGURA 4.12: Función *Giro(n°)*. Al ejecutarse la plataforma gira en torno a su eje los grados enteros que se hayan introducido.

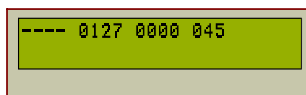


FIGURA 4.13: Ejemplo de lecturas al concluir la rutina *Rotación*.

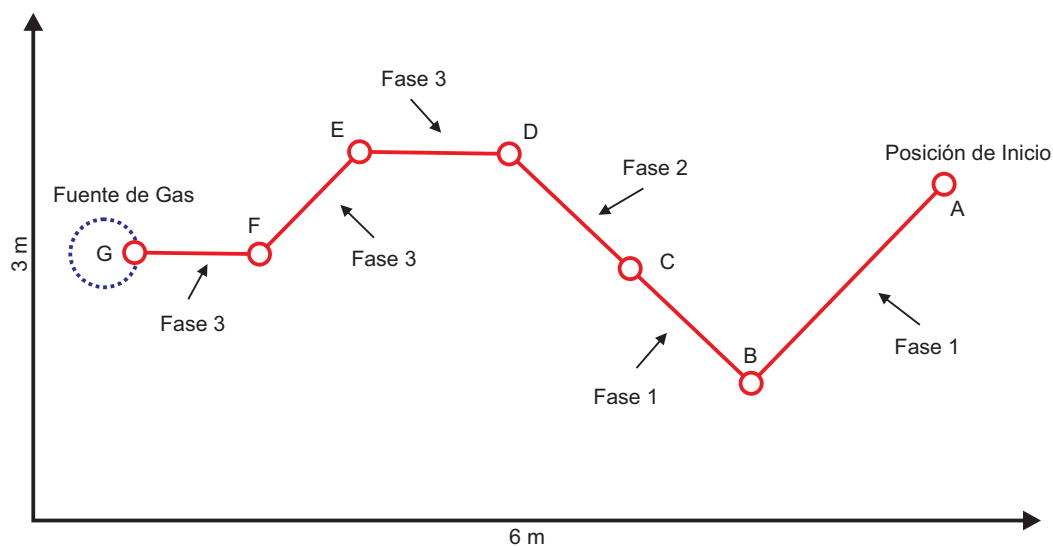
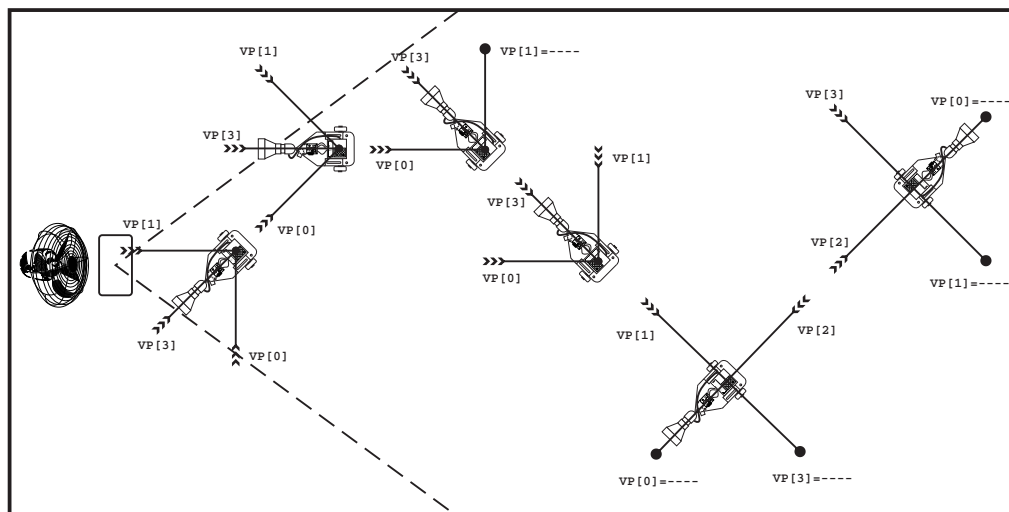


FIGURA 4.14: Posible trayectoria del sistema.

la segunda se tiene una pendiente positiva entre sus puntos extremos, para la tercera se nota que se tuvo una pendiente negativa entre sus puntos extremos, y para la última es claro que también se tiene una pendiente positiva entre sus puntos extremos. Ya que la diferencia  $V_L(t_{max}) - V_L(t_{min})$  es mayor para la segunda lectura, el sistema se ubicará en la posición `punto=1` y continuará con el algoritmo. La Figura 4.14 muestra al Algoritmo de Localización en operación generando una trayectoria típica de búsqueda del Sistema Localizador dentro de la habitación.

## Referencias

- [1] Busto O.; *La nariz electrónica: una nueva herramienta para analizar el aroma*; Revista de Enología Científica y Profesional; [http://www.acenologia.com/ciencia60\\_2.htm](http://www.acenologia.com/ciencia60_2.htm) accesada en Noviembre 2014.
- [2] *Microchip Technology Inc.*; <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/8bit/> accesado en Noviembre 2014.
- [3] *Migration Path Document: mikroBasic vs PICBasic Pro*; [http://www.mikroe.com/pdf/mikrobasic/migration\\_path.pdf](http://www.mikroe.com/pdf/mikrobasic/migration_path.pdf) accesado en Noviembre 2014.
- [4] Trincavelli M., Coradeschi S., Loutfi A.; *Classification of Odours whit Mobile Robots Based on Transient Response*; *International Conference on Intelligent Robots and System*; 2008; páginas 4110-4115.
- [5] Marques L., Osório L., Cabrita G.; *Mobile Robot Odor Plume Tracking Using Three Dimensional Information*; *Learning Systems Lab, AASS*; 2011; páginas 165-170.



**A**HORA diseñado y construido el módulo Olfato Electrónico y optimizado el Algoritmo de Localización de Fugas de Gas, es tiempo de mostrar las evidencias experimentales del trabajo. Se describirán los detalles de las experiencias, sus resultados y las conclusiones que éstas han permitido.

## 5.1. Experiencias

Para probar el funcionamiento del Sistema Localizador se procedió a simular una fuga de gas dentro de una habitación vacía según las dimensiones mostradas en la Figura 5.1. Se dispuso de una charola de 13×23×3 cm (900 mL) procurando tenerla siempre a media capacidad con alcohol etílico de farmacia (70°) frente a un ventilador de potencia variable (3 intensidades) seleccionada siempre la menor. Infortunadamente no se poseen datos técnicos sobre el mismo, mas que su potencia máxima es de 60 W. Con todo ello se busca generar una traza de gas etanol dentro de la habitación con cierta constancia en velocidad y dirección. El arreglo se puede notar en la Figura 5.2.

En este aspecto Ishida [1] comenta que la difusión de las moléculas de los odorantes es un proceso extremadamente lento. Él reporta que la difusión constante del vapor de etanol en el aire es de  $0.119 \text{ cm}^2/\text{s}$  a  $25 \text{ °C}$  y  $1 \text{ atm}$ . Entonces la difusión radial en una hora será de sólo de 11.6 cm. En entornos exteriores y en la mayoría de los interiores la velocidad del medio –aire– dominará sobre la lenta difusión. Por lo tanto, es la turbulencia del flujo portador lo que determina la distribución de las moléculas de gas. Marques *et al.* [2] presenta una aproximación para la dispersión del vapor de etanol en aire basada en una expresión gaussiana, mientras que Song *et al.* [3] construye una ecuación de distribución del gas basada en la «integral de difusión de soplo», también

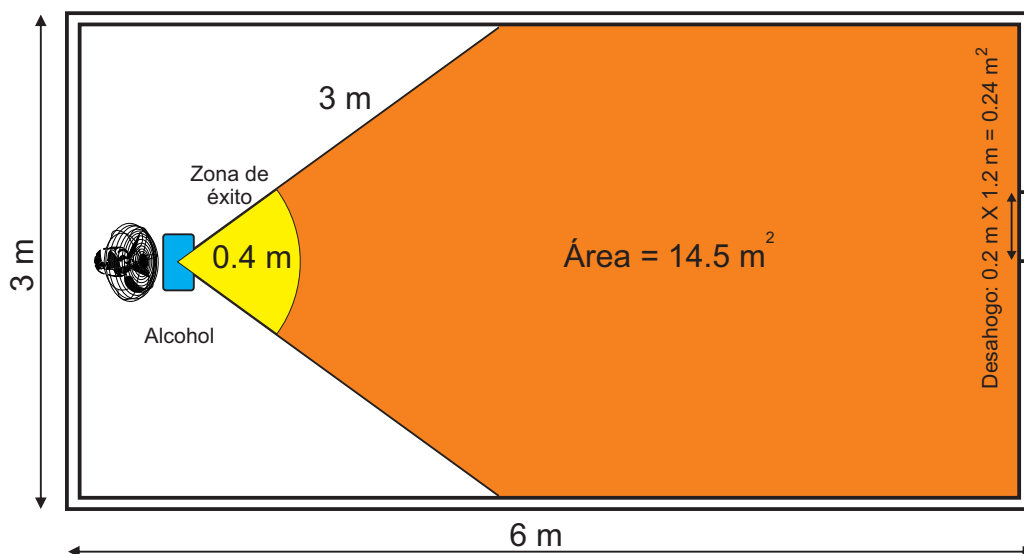


FIGURA 5.1: Dimensiones de la habitación donde se realizaron todas las pruebas. Se presenta también el área de operación óptima en color naranja.

basada en un modelo gaussiano; ambos concluyen que en un ambiente real la traza es totalmente irregular debido a turbulencias en el flujo.

Para las experiencias se procedió según el siguiente **protocolo**:

1. Permitir al sensor estabilizarse en una zona sin la presencia del gas objetivo. El Modo Espera indicará cuando el sensor esté listo.
2. Introducir al Sistema Localizador en la habitación enrarecida con el ventilador generando la traza. Se sugiere colocar el robot en la zona de detección óptima. Se debe procurar además proveer un medio de desahogo en la habitación.
3. Desbloquear la plataforma para iniciar la búsqueda. Los movimientos iniciales demorarán un par de minutos, esto ya que el sensor se debe estabilizar nuevamente según el ambiente actual.
4. Debido a los problemas que implica, el Sistema llegará hasta la fuga pero no se detendrá en ella. Actualmente es necesario que el usuario interrumpa los movimientos del sistema cuando se halle en un radio de alrededor de 40 cm de la fuga.

Este pequeño protocolo es resultado de las diversas pruebas que se realizaron con el sistema en desarrollo y ya concluido.



FIGURA 5.2: Fuente de gas. Se aproxima una fuga de gas mediante un ventilador de baja potencia y una charola de área 13×23 cm conteniendo alcohol etílico de farmacia.

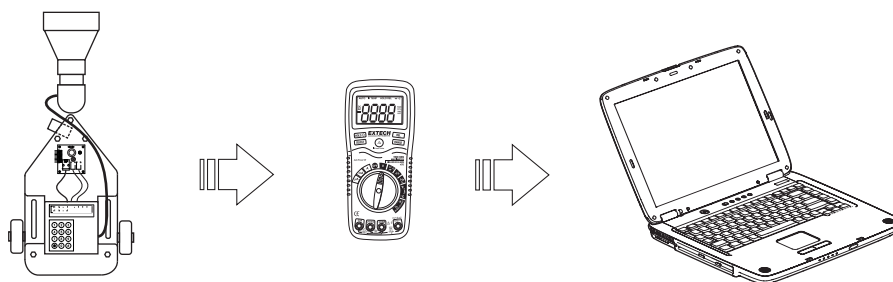


FIGURA 5.3: Colecta de datos hacia la computadora. El voltaje  $V_L$  es medido por un multímetro y llevado al ordenador por medio de USB.

## 5.2. Resultados

Gracias a la interfaz implementada en la consola (*jack invertido*), es posible conectar con facilidad un multímetro para coleccionar los valores de  $V_L$ . Estos valores son transferidos al ordenador por medio de USB así como lo sugiere la Figura 5.3, y visualizados en tiempo real. De este modo se lograron trazar diversas curvas  $V_L$  contra tiempo que a continuación se presentan.

Primero se iniciará con un pequeño análisis del comportamiento del sensor con y sin la cubierta de hule espuma. Esta cubierta se colocó con la intención de darle mayor estabilidad al sensor evitando cambios de temperatura debido a la pronta disipación de calor, disipación causada por el flujo de aire por la operación del ventilador. La Figura 5.4 muestra la presencia y ausencia física del cubrimiento para el sensor utilizado; el ventilador se energizó con una fuente de voltaje independiente de la utilizada para alimentar al TGS, esto claro con el fin de evitar las típicas variaciones de voltaje al encender o apagar un motor. Se esperó la estabilización del sensor sin el ventilador

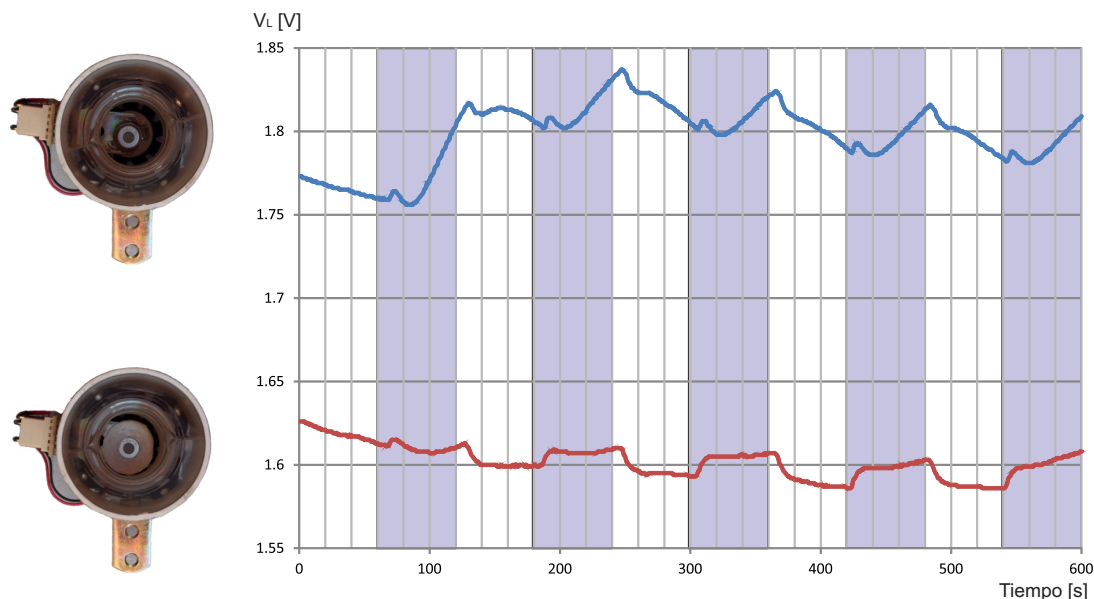


FIGURA 5.4: Respuesta del sensor sin y con cubierta. El ventilador opera en las regiones oscuras. Para estos resultados se utilizaron dos fuentes de voltaje, una para el sensor y otra para el ventilador.

funcionando para después encender y apagar el ventilador con una frecuencia de 60 segundos, sólo con aire limpio circundante; los resultados según la gráfica de la Figura 5.4. Se logra notar que el sensor con cubrimiento alcanza en alrededor de 10 s alguno de los dos estado base –con presencia de flujo de aire y sin él– mientras que para el sensor sin cubrimiento no le son suficientes 60 s para alcanzar alguno de los dos estados base.

Las Figura 5.5 muestra el comportamiento de dos sensores TGS recién son encendidos con al menos una noche de inactividad. Se realizaron cuatro «inicios en frío» para cada uno, notándose claramente en la figura dos comportamientos bien definidos y diferenciables. Esto concuerda con lo estudiado en el Capítulo 2 donde se evidenció que de forma general no hay dos TGS iguales, y se hace patente en su estado base inmediato. Por medio de las gráficas exhibidas en la Figura 5.5 se percibió que para los objetivos propuestos se podía considerar que el sensor se estabiliza al pasar sólo 300 s (5 minutos), información que se ve reflejada en la operación del sistema por medio del Modo Espera. El grupo inferior de trazos corresponde al sensor TGS empleado teniéndose como estado base un valor alrededor de  $V_L = 1.6$  V.

Para la Figura 5.6 con resultados según la Figura 5.7, se notan cuatro posiciones de suma atención en el comportamiento del sensor. Esto porque se intuye que dichas posiciones implican los cambios más representativos y lógicos al estar el eje de la rotación justo frente a la traza, porque si no, qué se podía esperar de otras posiciones donde es más tenue o turbulenta la traza. Para alivio del proyecto, los resultados fueron consistentes según las posiciones, como lo evidencia la Figura 5.7.

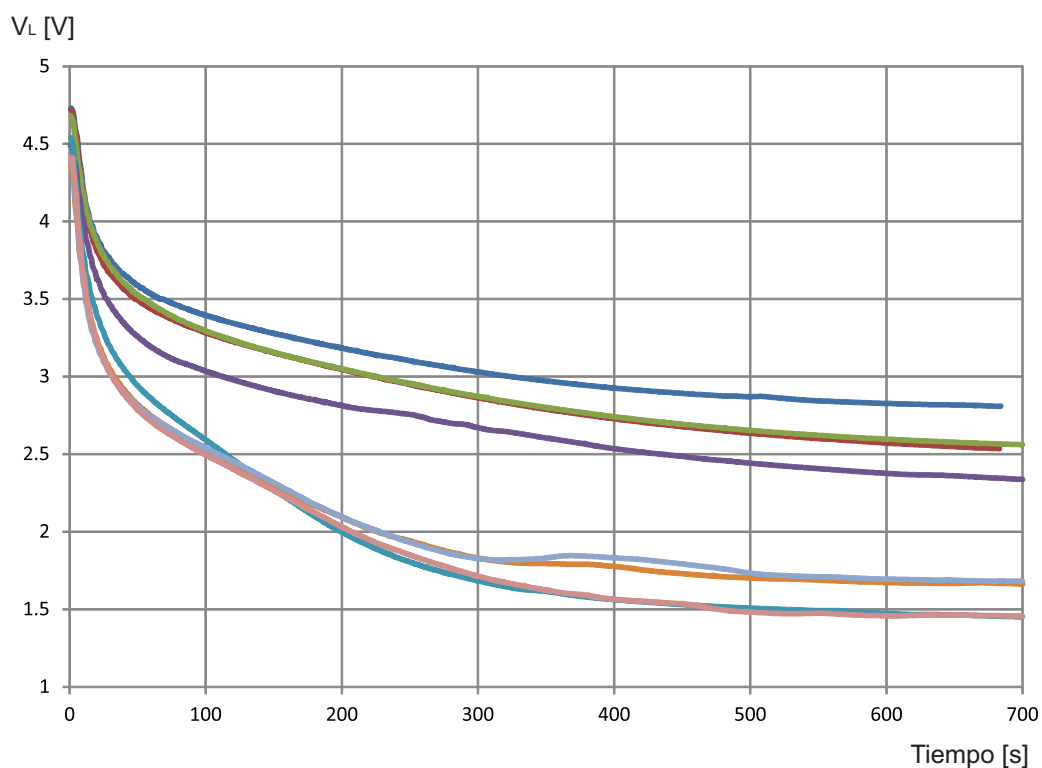


FIGURA 5.5: Inicio de dos sensores TGS 2620. Los sensores en un principio se encuentran inutilizados por al menos una noche.

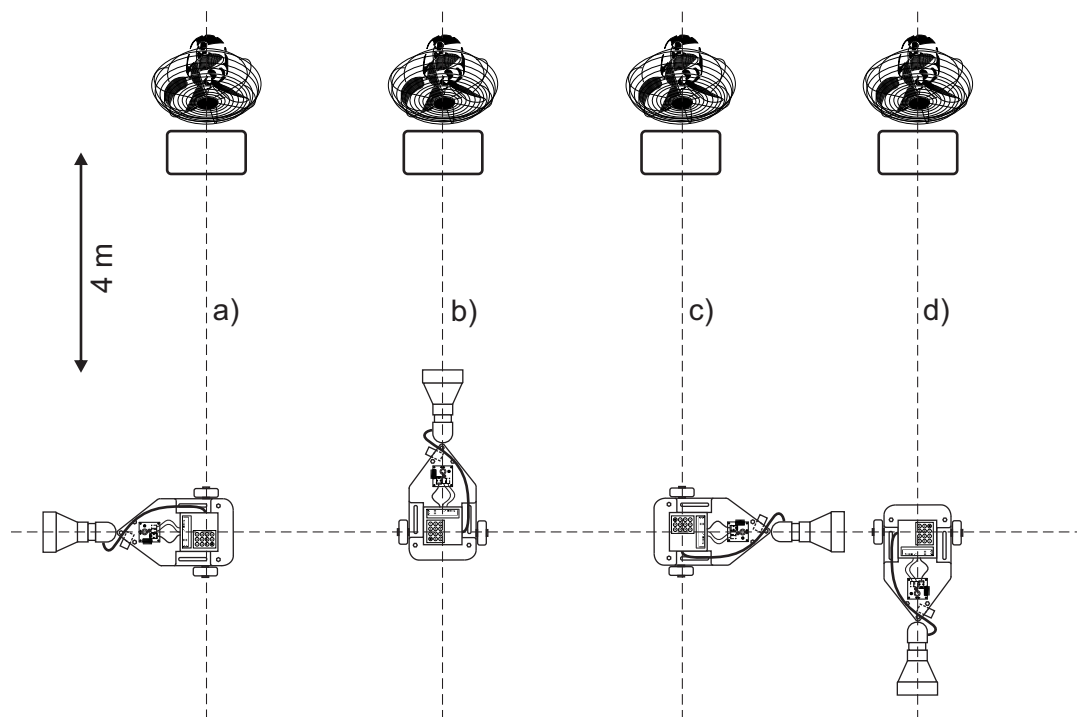


FIGURA 5.6: Configuraciones para notar el comportamiento del sistema ante cuatro posiciones distintas, entorno a un mismo punto. Los cambios de posiciones se realizan autónomamente.

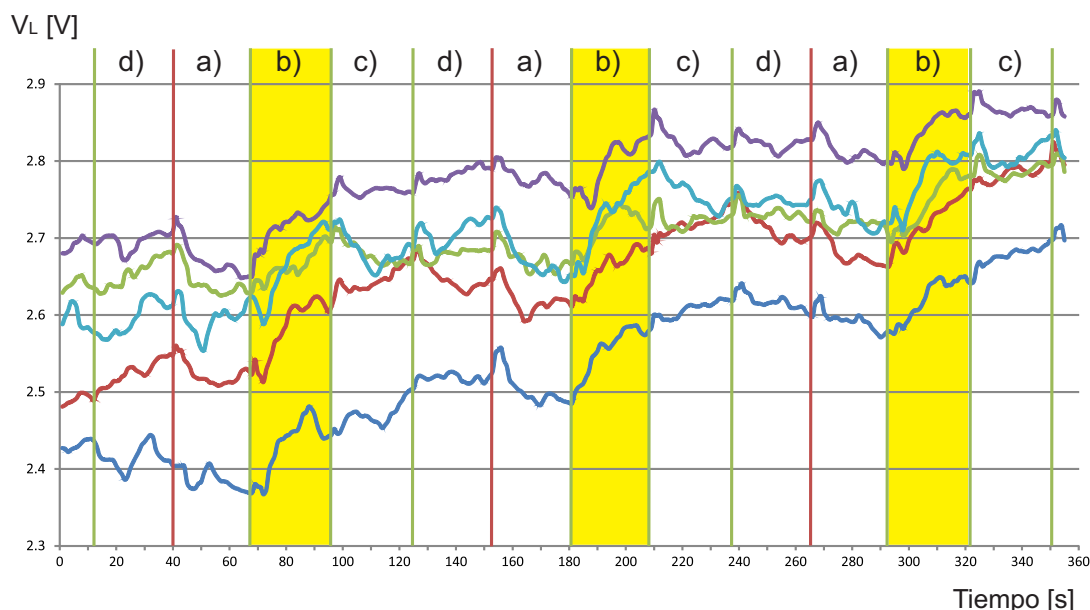


FIGURA 5.7: Respuesta del sensor rotando sobre un mismo punto, como lo muestra la Figura 5.6.

En lo que respecta a la Figura 5.8, se muestran 5 recorridos exitosos utilizando el algoritmo de localización a partir de una distancia de 5 m de la fuga, con una posición inicial de la plataforma no repetida, a distinta hora del día y en diferentes condiciones climáticas. El sistema fue obligado a cesar la coleccionar datos pocos segundos después de que la plataforma se hallara alrededor de 40 cm del recipiente. En este sentido se debe notar el problema que representa para el sistema identificar hasta dónde es necesaria la búsqueda, al menos con la información plasmada en la figura.

A la fecha se han realizado 20 pruebas finales con el algoritmo presentado en la Sección 4.5.1 (última versión) a una distancia entre 4 y 5 m de la fuga en ubicaciones que cubren en su mayoría la superficie expuesta como óptima en la Figura 5.1, con distintas ubicaciones iniciales, a distinta hora del día con diferentes condiciones climáticas, llegando en todos los eventos el Sistema Localizador a una distancia de alrededor de 40 cm de la fuga, en un tiempo promedio de 7 minutos. Justamente cinco de esos veinte eventos son los graficados en la Figura 5.8. Para la primera gráfica se muestran las medidas de voltaje  $V_L$  que ofreció el multímetro, mientras que la segunda gráfica consiste en los cálculos de concentración  $C$  que permite la ecuación (3.22) a través del voltaje  $V_L$ . Con estos resultados de concentración es posible definir el valor de  $R_L$  según la Sección 2.2.5, para los valores típicos que se detectan en la habitación. Según las pruebas realizadas el valor promedio de concentración es de 127 ppm lo que corresponde a una resistencia  $R_S = 4.95 \text{ k}\Omega$ . Apegándose a lo visto en la Sección 2.2.5, para las características del experimento, se requiere una resistencia de carga de  $R_L = R_S = 4.95 \text{ k}\Omega$ , o de  $5.1 \text{ k}\Omega$  en su valor comercial más cercano.

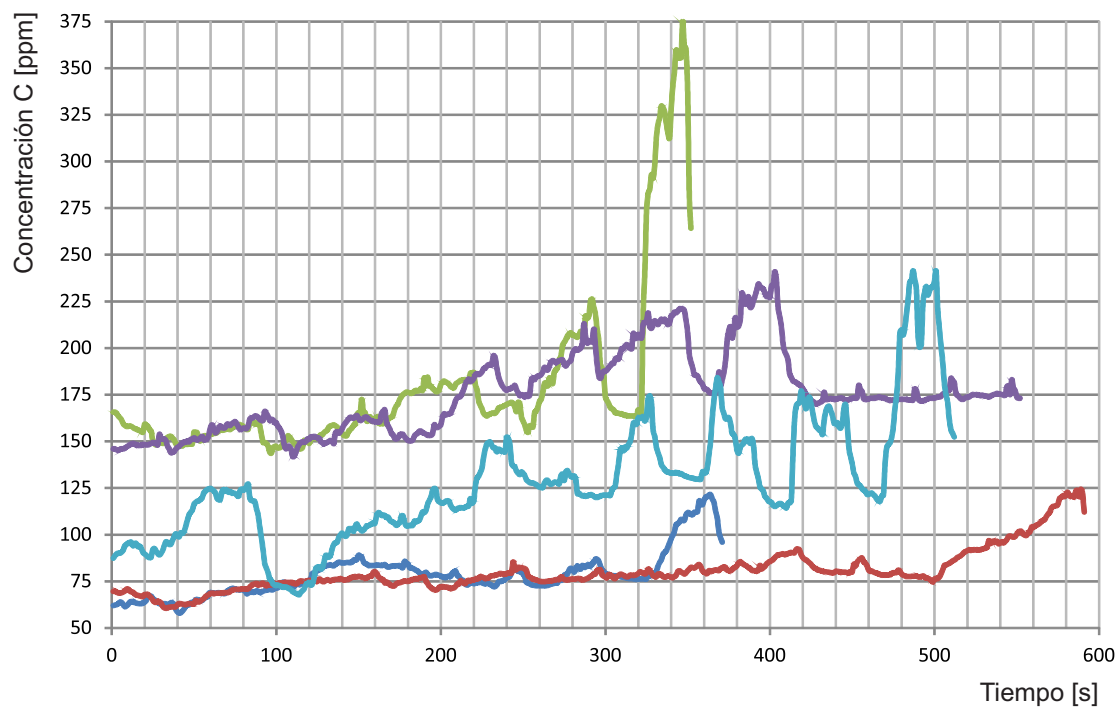
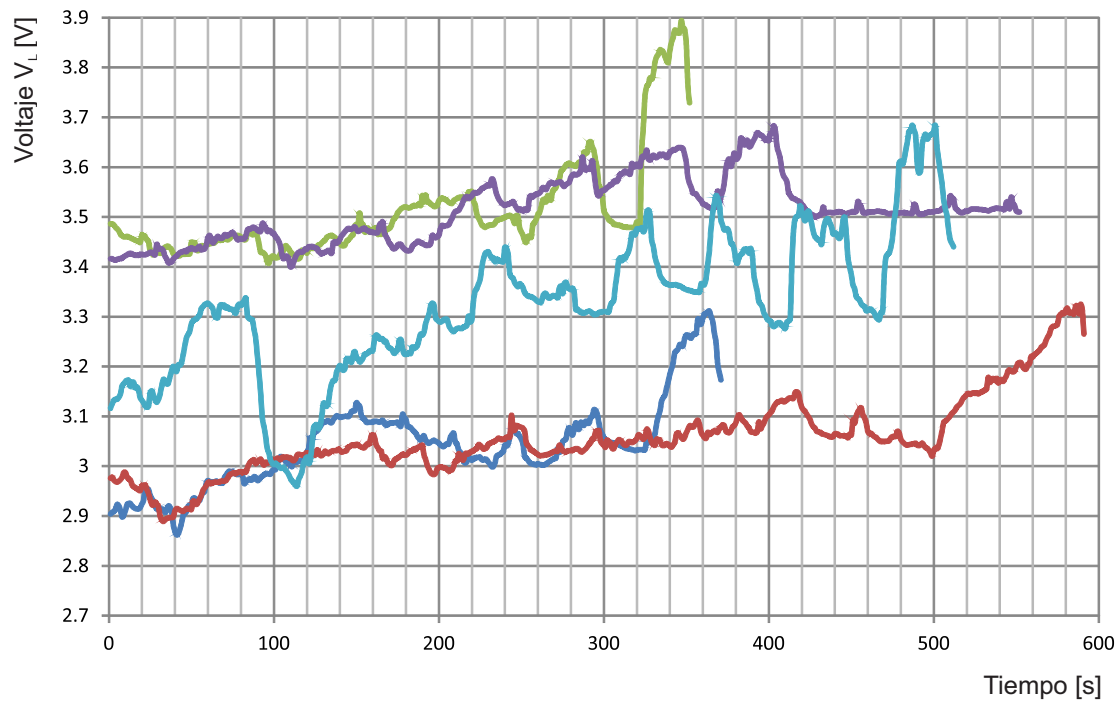


FIGURA 5.8: Respuesta del sensor en plena localización, tanto en voltaje  $V_L$  como en concentración  $C$ . Todas las pruebas exitosas.

### 5.3. Conclusiones

Se diseñó y construyó un Sistema Autónomo Localizador de Fuentes de Gas que cumple con los requerimientos y circunstancias inicialmente planteados. Se estableció además un pequeño protocolo para la mejor localización de la fuga.

Es importante subrayar que la mayoría elementos empleados son de fácil y económica adquisición. El número de elementos es reducido, esto se nota con el solo hecho de mencionar que se utilizó un único sensor TGS lo que hace muy llamativo el desarrollo del sistema. La comunicación por protocolo con la plataforma también es un punto resaltable pues la locomoción pasó a ser un asunto secundario y muy sencillo, a saber.

El desarrollo del proyecto mostró que algunos elementos específicos son indispensables y que a primera vista no lo fueron, como el embudo boca de botella que canaliza las corrientes al sensor TGS, el sensor ultrasónico que evita colisiones y pérdida de tiempo en capturas innecesarias, la LCD y teclado –invaluables a nuestra percepción–. Y además de los elementos también se mostraron procedimientos indispensables, como el tiempo de calentamiento del TGS antes de iniciar la búsqueda. Asimismo también se hizo notar la necesidad de algunos otros elementos faltantes, como un anemómetro, para reducir el tiempo y simplificar la trayectoria de búsqueda.

Es importante buscar estandarizar de alguna forma los efectos obtenidos por el ventilador y de forma general, buscar estandarizar la misma simulación de la fuga. Concerniente al ventilador, con los caudales utilizados local y actualmente quizá con un anemómetro será suficiente para una escala cuantitativa. Entonces se deberá verificar otras formas de simular la fuga de forma más precisa evitando principalmente el uso del ventilador. La necesidad de un anemómetro dentro del sistema parece evidente pues además de la concentración se podría trabajar con velocidad-dirección de la traza, sin embargo se deberá tener en cuenta que para velocidades muy pequeñas como las que posee el aire en una habitación en calma, en promedio de 6 cm/s [4], se requerirá un anemómetro con características especiales que quizá podría ser desarrollado dentro del Cuerpo Académico. Por ejemplo, Moshayedi *et al.* [5] (2013) presenta el desarrollo de un detector de viento enfocado a robots localizadores de fugas de gas con un rango de detección de 0.9 m/s a 4 m/s.

También se propuso una forma alterna para caracterizar los sensores TGS simplificando diversos aspectos técnicos. Desde el cálculo de la concentración de gas hasta la adaptación de una cámara de gas, fueron pensados para simplificar el proceso de caracterización. Es claro que se necesitan más pruebas para alcanzar un proceso sistemático

bajo las circunstancias de temperatura y humedad, pero los datos obtenidos, en resonancia con los ofrecidos por el fabricante, son un incentivo para en un futuro próximo dedicar más tiempo y elementos para este fin. Con la caracterización, se logró definir la ecuación que rige al sensor empleado bajo circunstancias específicas de temperatura y humedad; con ella se ha determinado el valor óptimo de  $R_L$  según las circunstancias de las pruebas.

Con respecto a la localización, en el medio se hacen presentes turbulencias, vórtices y nubes de concentración que hacen imperativo el tratamiento de datos; no simplemente se trata de seguir la lectura más alta ya que ésta sólo indicaría donde se halla la mayor concentración de gas que no necesariamente coincidirá con la dirección de la fuente. Es por ello que en este trabajo se propuso un algoritmo básico que resulta ser la aproximación para ideas más elaboradas y potentes, pero que por sí solo ya resulta un pequeño éxito.

## 5.4. Presentaciones y Productos

- LVI Congreso Nacional de Física 2013, San Luis Potosí.
- LVII Congreso Nacional de Física 2014, Mazatlán.
- Plataforma Robótica aceptada para registro de patente.

.....

El sistema pasará a conformar un producto más del Cuerpo Académico de Optoelectrónica y Fotónica de la UAP, sistema al cual le falta un sinnúmero de mejoras y le sobra otro igual número de problemas, pero citando a un viejo conocido...

*Eppur si muove.*

## Referencias

- [1] Ishida H.; *Robotic Systems for Gas/Odor Source Localization: Gap between Experiments and Real-Life Situations*; *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*; 2007; páginas 3-8.
- [2] Marques L., Nunes U., Almeida A.; *Olfaction-based Mobile Robot Navigation*; *Thin Solid Films*; 2002; páginas 51-58.

- [3] Song K., Liu Q., Wang Q.; *Olfaction and Hearing Based Mobile Robot Navigation for Odor/Sound Source Search*; *Sensors 2011*; 2011; páginas 2129-2154.
- [4] Trincavelli M., Coradeschi S., Loutfi A.; *Classification of Odours whit Mobile Robots Based on Transient Response*; *International Conference on Intelligent Robots and System*; 2008; páginas 4110-4115.
- [5] Moshayedi A., Gharpure D.; *Design and Development Of MOKHTAR Wind Tracker*; *International Journal of Soft Computing and Engineering*; 2013; páginas 167-173.



## Registros de la Plataforma

**P**ARA conducir la plataforma móvil se le requiere transmitir por protocolo I<sup>2</sup>C la instrucción llamada **VECTOR**. Esta instrucción se verá conformada por dos registros de ocho bits, **DIRECCIÓN** y **MAGNITUD**, y siempre estará generada por el módulo de control.

El primer byte a transmitir debe ser **DIRECCIÓN** seguido de **MAGNITUD**. La dirección del dispositivo a transmitir, es decir, la dirección de la plataforma es 01111000 (78h).

Los estados en los que se puede encontrar a la plataforma son los siguientes:

- ➡ **LIBRE**. La plataforma está lista para ejecutar alguna instrucción.
- ➡ **OCUPADO**. La plataforma se halla inutilizable temporalmente. Se ignora cualquier instrucción.
- ➡ **ALTO**. La plataforma se halla inutilizable permanentemente. Se ignora cualquier instrucción.

Una vez encendida la plataforma esta se verá en estado **OCUPADO** por defecto. Para poder activarla (led encendido) es necesario pulsar el botón **INICIO** llevándola así al estado **LIBRE**. Si por alguna razón se requiere deshabilitar la plataforma durante la ejecución de una trayectoria se deberá pulsar nuevamente el botón **INICIO**, así la plataforma pasará al estado **ALTO**, deteniéndose e ignorando toda instrucción. Esta estado se caracteriza por el titilo del led de estado. Para sacar a la plataforma de dicho estado se requiere reiniciarla por el interruptor maestro.

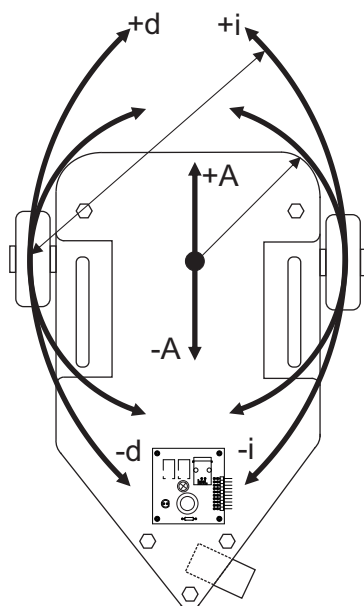


FIGURA A.1: Movimientos posibles. Nótese los diferentes radios: el más grande corresponde a un giro teniendo como centro una de las ruedas, el más pequeño a una rotación sobre sí mismo.

Cada vez que se le envíe la instrucción VECTOR (dos bytes: DIRECCIÓN y MAGNITUD), la plataforma pasará a estado OCUPADO con el fin de realizar el o los movimientos solicitados en VECTOR, ignorando toda nueva instrucción. Una vez finalizada la instrucción, la plataforma pasará a estado LIBRE esperando nuevas instrucciones. Será responsabilidad del módulo de control verificar el estado de la plataforma para no enviar instrucciones nuevas en el estado OCUPADO.

El estado OCUPADO y LIBRE están caracterizados por la transmisión desde la plataforma de los bytes ♣0000000 y ♣1111111, respectivamente. El valor del bit ♣ quedará determinando según el nivel de la batería: ♣=1 si el nivel de la batería es aceptable, ♣=0 si no. Así, si el módulo de control lee por el bus y obtiene ♣0000000 la plataforma está ocupada realizando una trayectoria (o no se ha apretado el botón INICIO); o si recibe ♣1111111, la plataforma está lista para una nueva instrucción.

De esta forma, el módulo de control envía un VECTOR, espera su ejecución y si se requiere, vuelve a enviar otro VECTOR. El envío de instrucciones no tiene límite.

**REGISTRO: DIRECCIÓN**

7	6	5	4	3	2	1	0
DG2	DG1	MG5	MG4	MG3	MG2	MG1	MG0

Leyenda	DG= Dirección de Giro	MG=Magnitud de Giro
---------	-----------------------	---------------------

bit 7-6            **DG<2:1>** Dirección de Giro  
 00 = Izquierda positivo (+i)  
 01 = Izquierda negativo (-i)  
 10 = Derecha positivo (+d)  
 11 = Derecha negativo (-d)

bit 5-0            **MG<5:0>** Magnitud de Giro  
 111111 = Rotación sobre sí mismo a favor de las manecillas del reloj  
 111110 = Rotación sobre sí mismo en contra de las manecillas del reloj  
 111101  
       ⋮            } = Magnitud de giro  
 000001  
 000000 = Sin giro

**REGISTRO: MAGNITUD**

7	6	5	4	3	2	1	0
DA	MA6	MA5	MA4	MA3	MA2	MA1	MA0

Leyenda	DA= Dirección de Avance	MA=Magnitud de Avance
---------	-------------------------	-----------------------

bit 7                **DA** Dirección de Avance  
 0 = Avance hacia adelante (+A)  
 1 = Avance hacia atrás (-A)

bit 6-0            **MA<6:0>** Magnitud de Avance  
 1111111  
       ⋮            } = Magnitud de avance  
 0000001  
 0000000 = Sin avance