



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y LA MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
MECATRÓNICO PORTABLE CON DOPAJE AUTOMÁTICO
PARA DETECCIÓN DE MUESTRAS EXPLOSIVAS”**

AUTORES:

VALLEJO RODRÍGUEZ ZULETH PAMELA

ZURITA TRUJILLO DANIEL ANTONIO

DIRECTORA: ING. GUAMÁN ANA PhD

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y LA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PORTABLE CON DOPAJE AUTOMÁTICO PARA DETECCIÓN DE MUESTRAS EXPLOSIVAS”*** ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los señores ***VALLEJO RODRÍGUEZ ZULETH PAMELA*** y ***ZURITA TRUJILLO DANIEL ANTONIO*** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 24 de Agosto del 2017

ING. ANA GUAMÁN PhD

DIRECTORA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y LA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **VALLEJO RODRÍGUEZ ZULETH PAMELA**, con cédula de identidad N° 1722784350 y **ZURITA TRUJILLO DANIEL ANTONIO**, con cédula de identidad N° 1720222239, declaramos que este trabajo de titulación "**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PORTABLE CON DOPAJE AUTOMÁTICO PARA DETECCIÓN DE MUESTRAS EXPLOSIVAS**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 24 de Agosto del 2017

VALLEJO RODRÍGUEZ ZULETH PAMELA

C.C 1722784350

ZURITA TRUJILLO DANIEL ANTONIO

C.C 1720222239



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y LA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **VALLEJO RODRÍGUEZ ZULETH PAMELA** y **ZURITA TRUJILLO DANIEL ANTONIO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO POR-TABLE CON DOPAJE AUTOMÁTICO PARA DETECCIÓN DE MUESTRAS EXPLOSIVAS”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 24 de Agosto del 2017

VALLEJO RODRÍGUEZ ZULETH PAMELA

C.C 1722784350

ZURITA TRUJILLO DANIEL ANTONIO

C.C 1720222239

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios el centro de mi vida, la guía en mi camino; a mis padres, Alberto y Jacqueline quienes son el pilar fundamental en mi vida y han sido testigos y partícipes del esfuerzo realizado cada día para poder culminar la carrera estudiantil; a Jorge y mis hermanas Poleth y Yamileth, quienes incontables veces me dieron su apoyo incondicional emocionalmente e intelectualmente, fomentando mi interés por la carrera y brindándome su cariño; por todas sus enseñanzas y el valor que tienen cada uno para mí, este logro es por y para ustedes.

Zuleth Pamela Vallejo Rodríguez

“La vida no es una lucha. Es un esfuerzo” -Marcelo Zurita

Este triunfo es suyo Anita Trujillo y Marcelo Zurita, porque cada paso lo he dado junto a ustedes. A mis hermanos Christian, Anabelle y Marcela, por brindarme su apoyo y palabras de ánimo cuando más lo necesitaba. A ti Dios porque sé que tus planes y caminos son más grandes que los míos, más altos que el cielo sobre la tierra.

Daniel Antonio Zurita Trujillo

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por permitirnos este logro tan anhelado, a nuestros compañeros de aulas, a nuestros queridos profesores quienes han alimentado nuestro conocimiento a lo largo de la carrera universitaria, a la Ing. Anita Guamán quien nos ha brindado su apoyo incondicional a pesar de todas las circunstancias que se han presentado, al Ing. Rafael Espinoza quien contribuyó de manera activa y desinteresada para la realización de este proyecto.

Zuleth Pamela Vallejo Rodríguez

Daniel Antonio Zurita Trujillo

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 <i>Historia de Narices Electrónicas</i>	3
1.1.2 <i>Aplicaciones de las narices electrónicas</i>	4
1.1.3 <i>Sensores Químicos</i>	6
1.1.4 <i>Sistemas de toma de muestras en Narices Electrónicas</i>	7
1.1.5 <i>Dopaje de muestras en narices electrónicas</i>	8
1.1.6 <i>Sistemas de Control en narices electrónicas</i>	9
1.1.7 <i>Trabajos Previos</i>	10
1.2 Justificación e Importancia	11
1.3 Objetivos	13
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	13

1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	13
1.4	Descripción de proyecto	14
CAPÍTULO II ANÁLISIS DE MATERIALES PARA LA CÁMARA DE SENSORES.....		17
2.1	Estado del Arte.....	17
2.2	Selección de materiales mediante método tradicional.....	18
2.3	Desarrollo Experimental	24
2.4	Resultados	28
2.4.1	<i>Cálculo del espesor de la cámara de sensores</i>	28
2.4.2	<i>Resultados del análisis de material</i>	29
CAPITULO III DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LA CÁMARA DE SENSORES		35
3.1	Sistema de control en narices electrónicas estado del arte.....	35
3.2	Necesidad de una etapa de control.....	37
3.3	Requerimientos para el diseño del sistema de control	38
3.4	Selección de actuador y sensor	39
3.4.1	<i>Actuador</i>	39
3.4.2	<i>Selección del sensor</i>	45
3.5	Dimensionamiento de conversor A/D para el sistema de control.....	47
3.6	Dimensionamiento de conversor D/A.....	48

3.7 Diseño del sistema de control de temperatura	49
3.7.1 Modelamiento de la planta	50
3.7.2 Análisis de la respuesta del sistema.....	52
3.7.3 Cálculo periodo de muestreo	53
3.7.4 Discretización del sistema	54
3.7.5 Diseño del controlador	54
3.7.6 Valores base de diseño para la aplicación.....	57
3.8 Resultados	64
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA CONVECTIVA DE MASA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DOPAJE AUTOMÁTICO.	68
4.1 Metodología Experimental.....	68
4.2 Ecuaciones y ejemplos de cálculos	70
4.3 Tiempo de transferencia convectiva de masa	74
4.4 Implementación de sistema automático de inyección de dopante a la muestra..	75
4.5 Experimentación	77
4.6 Resultados	78
CAPÍTULO V ANÁLISIS DE MECÁNICA DE FLUIDOS PARA UN PROCESO DE RESPIRACIÓN DEL DISPOSITIVO NARIZ ELECTRÓNICA.....	81
5.1 Diseño del sistema neumático del proceso de respiración del dispositivo	81

5.2 Diseño y dimensionamiento de componentes para el proceso óptimo de respiración del dispositivo	89
5.3 Metodología Experimental.....	90
5.4 Ecuaciones utilizadas para la determinación de flujo volumétrico necesario en el dispositivo	91
5.5 Valores de parámetros utilizados en el diseño y dimensionamiento de partes del sistema.....	92
5.6 Dimensionamiento del compresor de aire.....	93
5.7 Análisis de la variación de diámetros en el sistema de nariz electrónica	93
5.8 Experimentación	94
5.9 Resultados	97
CAPÍTULO VI RESULTADOS.....	100
6.1 Integración del prototipo.....	100
6.2 Experimentación	108
6.2.1 Afectación de la temperatura en la lectura de los sensores.....	108
6.2.2 Dispositivo expuesto a muestras de olores diferentes.....	109
6.3 Análisis de resultados del prototipo completo.....	110
6.3.1 Sistema de control de temperatura en la cámara de sensores	110
6.3.2 Diferenciación entre TNT y otras muestras	112
6.3.3 Respiración del dispositivo	114

6.3.4 Mejora prototipo inicial	114
6.3.5 Análisis mecánico del dispositivo con carga de impacto.....	116
6.4 Costos	118
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
7.1 Conclusiones	123
7.2 Recomendaciones.....	124
REFERENCIAS	125
ANEXOS.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Identificación de necesidades para el material de la cámara de sensores	21
Tabla 2	Requerimientos selección de material cámara de sensores.....	22
Tabla 3	Matriz de selección de materiales entre los comúnmente utilizados en las cámaras de sensores de narices electrónicas.....	23
Tabla 4	Matriz de selección de aceros comúnmente utilizados en las cámaras de sensores de narices electrónicas	24
Tabla 5	Parámetros para experimentación del material de la cámara de sensores.....	26
Tabla 6	Tiempo de duración experimento por material	28
Tabla 7	Parámetros a analizar en los datos obtenidos por los sensores para la selección del material	31
Tabla 8	Parámetros fundamentales de datos tomados por los sensores en cámaras de sensores de distintos materiales	32
Tabla 9	Parámetros a analizar en los datos obtenidos por los sensores para la selección del sensor de temperatura	39
Tabla 10	Matriz de selección circuito de control de potencia.....	42
Tabla 11	Características principales del MOC 3041.....	44
Tabla 12	Características Triac BT136.....	44
Tabla 13	Resultados de los componentes circuito de acondicionamiento actuador	44
Tabla 14	Selección de sensores de temperatura.....	46
Tabla 15	Matriz de selección de sensor de temperatura	47
Tabla 16	Primeros valores tomados en el experimento escalón de voltaje vs temperatura	49
Tabla 17	Parámetros obtenidos en la respuesta en lazo cerrado del sistema sin controlador simulación	56
Tabla 18	Valores ideales para el diseño del controlador de la planta	57

Tabla 19	Resumen de características de Acciones de control.....	58
Tabla 20	Funciones de transferencia de la planta y el controlador	59
Tabla 21	Parámetros importantes de la respuesta del sistema controlado	62
Tabla 22	Parámetros para experimentación	65
Tabla 23	Parámetros de los componentes del dopante.....	74
Tabla 24	Determinación de moles totales de la mezcla alcohol comercial.....	74
Tabla 25	Bases y parámetros utilizados para experimentación del dispositivo	74
Tabla 26	Resultados experimentación dopaje automático.....	79
Tabla 27	Datos calculados y obtenidos para tiempo de consumo del dopante	80
Tabla 28	Tabla de elementos del sistema neumático de respiración	83
Tabla 29	Elementos proceso de Aspiración	86
Tabla 30	Caídas de presión en el sistema de respiración	91
Tabla 31	Parámetros utilizados en el dimensionamiento del compresor	92
Tabla 32	Resumen de parámetros de selección del compresor.....	93
Tabla 33	Valor del flujo volumétrico real en el sistema de respiración.....	94
Tabla 34	Secuencia de respiración para el experimento	95
Tabla 35	Combinaciones de diámetros en contenedores	95
Tabla 36	Diseño 2 primeros experimentos variación de diámetros	96
Tabla 37	Flujos volumétricos medidos en diferentes combinaciones de diámetros	98
Tabla 38	Tiempos de respiración en el dispositivo	114
Tabla 39	Comparación prototipo inicial, prototipo actual	115
Tabla 40	Costos por partes del sistema E-NOSE (1 de 3)	119
Tabla 41	Costos por partes del sistema E-NOSE (2 de 3)	120

Tabla 42 Costos por partes del sistema E-NOSE (3 de 3) 121

Tabla 43 Total de costos E-NOSE 122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Funcionamiento sensor MOS	7
Figura 2 Diagrama de bloques sistema de control de temperatura y humedad.....	10
Figura 3 Dispositivo actual SmellRobSense	13
Figura 4 Procedimiento experimentación material cámara de sensores	27
Figura 5 Resultados datos tomados por material en el sensor 2 T-GS 826.....	30
Figura 6 Resultados datos tomados por material en el sensor 3 T-GS 826.....	30
Figura 7 Análisis de parámetros para selección de material en el sensor 3 TGS-822	33
Figura 8 Diagrama de bloques de un sistema de control analógico en lazo cerrado	37
Figura 9 Diagrama de bloques sistema de control general desarrollado.....	38
Figura 10 Esquema de ubicación de resistencias para control de temperatura.....	41
Figura 11 Circuito utilizado para los actuadores del sistema de control.....	41
Figura 12 Etapa de potencia tiristor	43
Figura 13 Circuito desarrollado Triac MOC.....	45
Figura 14 Datos importados en el comando ident para hallar la función de transferencia.....	50
Figura 15 Polos y ceros para hallar la función de transferencia en ident.....	51
Figura 16 Función de transferencia planta Ident Software de análisis matemático	51
Figura 17 Respuesta real del sistema a una entrada escalón.....	52
Figura 18 Respuesta en lazo cerrado de la planta	53
Figura 19 Respuesta del sistema en lazo cerrado sin controlador.....	55
Figura 20 Diagrama de Bode función de transferencia en lazo cerrado	56
Figura 21 Modelo PI obtenido en la aplicación PID Tuner de Software de análisis matemático.....	59

Figura 22 Respuesta en lazo cerrado del sistema controlado.....	61
Figura 23 Diagrama de bode del sistema controlado.....	62
Figura 24 Comparación de la respuesta del sistema en lazo cerrado controlado y sin controlar.....	63
Figura 25 Respuesta control de temperatura.....	66
Figura 26 Diagrama de flujo proceso de dopaje automático.....	76
Figura 27 Diagrama de sistema de inyección del dopante.....	77
Figura 28 Esquema de dopaje automático diseñado para experimentación.....	78
Figura 29 Resultados experimentación dopaje automático con tendencia lineal.....	79
Figura 30 Diseño esquema neumático de respiración.....	82
Figura 31 Diagrama de flujo subproceso de aspiración.....	85
Figura 32 Esquema subproceso de aspiración del dispositivo.....	85
Figura 33 Diagrama de flujo subproceso de limpieza.....	87
Figura 34 Esquema subproceso de limpieza del dispositivo.....	88
Figura 35 Diagrama de flujo de la secuencia de respiración de la nariz electrónica.....	89
Figura 36 Compresor Silent air PUMP SE-314.....	93
Figura 37 Variación de diámetros del contenedor.....	96
Figura 38 Flujos volumétricos medidos en diferentes combinaciones de diámetros.....	98
Figura 39 Resultados lectura de sensores variación de diámetros.....	99
Figura 40 Prototipo inicial de nariz electrónica E-NOSE.....	100
Figura 41 Esquema partes del sistema E-NOSE nariz electrónica desarrollada.....	101
Figura 42 Cámara de sensores.....	101
Figura 43 Circuitos electrónicos E-NOSE.....	102

Figura 44 Circuito neumático E-NOSE	103
Figura 45 Parte del dopaje automático.....	104
Figura 46 Depósito de muestras.....	104
Figura 47 Interfaz inicial adquisición de datos	105
Figura 48 Interfaz principal de adquisición de datos	105
Figura 49 Prototipo E-NOSE con dopaje automático desarrollado	106
Figura 50 Conexión del dispositivo al computador y a la toma de 110 V	106
Figura 51 Colocación de dopante en el contenedor principal.....	107
Figura 52 Contenedor de alcohol	107
Figura 53 Botón de encendido del dispositivo.....	107
Figura 54 Colocación de depósito de muestra y dopante.....	108
Figura 55 Diferencias entre mediciones del sistema a bajas temperaturas sin controlador y a una temperatura controlada	111
Figura 56 Diferencia de lectura de sensor 2 TGS-822 a bajas temperaturas, a una temperatura controlada y a altas temperaturas	112
Figura 57 Diferencias entre TNT y otras sustancias.....	113
Figura 58 Señales sensor 1 de diferentes sustancias.....	113
Figura 59 Diagrama de fuerzas para el cálculo del impacto	116

RESUMEN

En el Ecuador y el mundo actualmente uno de los mayores problemas de seguridad es el alto índice de tráfico de armas y explosivos, dicho tráfico es controlado por medio de personal especializado en explosivos y canes amaestrados por las Fuerzas Armadas o la Policía Nacional. Los controles son comunes en aeropuertos y sectores fronterizos de cualquier país, sin embargo el método de detección de explosivos actual es un potencial riesgo para quienes realizan este trabajo, es por esto que como alternativa ambiental y por seguridad se hace necesario hallar un método diferente de detección de explosivos. El proyecto actual propone otorgar una solución tecnológica al método tradicional de detección de explosivos ilegales, con la implementación de una nariz electrónica como dispositivo mecatrónico con dopaje automático. En este proyecto se realizaron estudios y experimentos con mecánica de fluidos y transferencia convectiva de masa; así también se desarrolló un sistema de control de temperatura, con la finalidad de que el dispositivo pueda ser utilizado en cualquier tipo de ambiente otorgando portabilidad al mismo. El prototipo lleva un método de dopaje automático que no altera la muestra a analizar. El prototipo de nariz electrónica desarrollado aumentó su portabilidad y mejoró considerablemente su funcionamiento en condiciones reales de análisis de sustancias.

PALABRAS CLAVE:

- **NARIZ ELECTRÓNICA,**
- **MECÁNICA DE FLUIDOS,**
- **DOPAJE,**
- **EXPLOSIVOS**
- **SISTEMAS DE CONTROL**

ABSTRACT

Nowadays, in Ecuador and in the entire World one of the biggest problems is the insecurity, combined the high rate of weapons and explosives traffic. Specialized personnel and well-trained dogs control this traffic; and the Army and the Ecuadorian National Police give special training, which support and supervise this activity commonly in airports and country border areas, however this kind of detection method is a potential risk for the people who work for it. So, for this reason is important to find an ecological and safe alternative. This project proposal gave a technological solution in comparison to the traditional method of illegal explosive detection, with the implementation of an electronic nose as a mechatronic device with automatic doping. In order to probe the method we are proposing, we experimented with fluid mechanics and convective mass transfer, as well as develop a temperature control system, which can be use in any kind of environment and giving, at the same time, a good portability option. The actual prototype system includes a doping automatic method that would not change the sample analysis and improve its functionality in real conditions.

KEYWORDS:

- **ELECTRONIC NOSE**
- **MECHANICS OF FLUIDS**
- **DOPING**
- **EXPLOSIVES**
- **CONTROL SYSTEMS**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El primer sistema capaz de detectar aromas de forma artificial se diseñó en la Universidad de Warwick en 1982 y recibió el nombre de nariz electrónica (Rodríguez Méndez, 2001). La nariz electrónica es un sistema para absorción de olores que está conformado por arreglos de sensores de gas y un software de reconocimiento de patrones, que en conjunto permiten captar aromas y después de un análisis estadístico determinar diferencias cualitativas y cuantitativas entre sustancias.

El sentido del olfato es quizás el menos apreciado de los cinco sentidos, sin embargo, este sentido es de gran utilidad en numerosas áreas. Actualmente existen varias narices electrónicas (tanto comerciales, como prototipos pre-competitivos), siendo más utilizadas en la industria alimenticia para mejorar procesos de calidad (Martí, 2004). En la industria cosmética las narices electrónicas son usadas para el control de calidad en perfumes, shampoo, jabones. A demás en el ámbito militar, las narices son usadas para poder prevenir accidentes, y evitar el tráfico de elementos ilegales como son las drogas, estupefacientes y explosivos, contribuyendo de manera significativa en la seguridad de la sociedad (Rodríguez Méndez, 2001).

Una nariz electrónica consta de una matriz de sensores que reaccionan al estar contacto con sustancias químicas. La respuesta de dichos sensores necesita de un software de análisis, que está constituido por un conjunto de modelos usando reconocimiento de patrones, para poder obtener como resultado la identificación de un aroma de forma cuantitativa o cualitativa. Además, una nariz electrónica necesita de un hardware que permita captar los aromas mediante el uso de instrumentación de sensores y transformarlos en señales eléctricas. Para que el aroma llegue a los sensores es necesario un método de respiración artificial, que normalmente se realiza con sistemas neumáticos. Los sensores

pueden ser excitados con la exposición de los volátiles del aroma, pero en algunas ocasiones se requiere añadir métodos adicionales; uno de estos métodos se denomina dopaje, que es mezclar la sustancia a analizar con un estimulante, normalmente alcohol (Mannino, 2006).

Para poder diseñar un prototipo de forma general que imite una nariz biológica, se considera algunos aspectos entre estos:

- **Sensores:** Los sensores para captar aromas son dispositivos fabricados con un material activo que se deposita en forma de película sobre un sustrato (Rodríguez Méndez, 2001) menciona que los sensores más adecuados son los sensores MOS (metal-oxide semiconductors), que funcionan por cambio en su resistencia al ser excitados.
- Los sensores deben ser colocados en la cámara de percepción de aromas de tal manera que estos puedan trabajar de manera integral (Rodríguez Méndez, 2001). Cuando un sensor se expone a una muestra, este presenta una respuesta característica; sin embargo los sensores son inespecíficos por lo que es necesario disponer de una matriz de sensores formada por diferentes elementos sensibles que produzcan una señal distinta frente a cierto aroma y que posteriormente sean analizados como un patrón de respuesta. Además, los sensores requieren de una calibración para poder relacionar la respuesta ante una diferente concertación o muestra. Es por ello que la cámara de sensores debe tener un control adecuado de humedad y temperatura, el control es necesario principalmente para que las señales obtenidas difieran en función de los factores externos y el uso.
- **Estructura y material de la cámara de sensores:** Es importante que el material que se use sea inodoro, es decir que no emita olores. Además no debe permitir que se adhieran los volátiles de las diferentes muestras, para de esta forma garantizar que el material no interfiera en la excitación de los sensores cuando estos perciban un aroma. En relación a la estructura esta se debe definir en función de la matriz de sensores y se debe tomar en cuenta que la geometría debe permitir que todos los

sensores sean expuestos en condiciones iguales permitiendo un correcto funcionamiento de la matriz. (E-Nose, 2014)

- Análisis de la respiración por medio de sistemas neumáticos y fluidos: La respiración en el sistema biológico es un punto clave para llevar los volátiles a los elementos sensoriales. Al ser un dispositivo electrónico, se debe mimetizar y definir un sistema de respiratorio óptimo para llevar la muestra a los sensores. Lo que implica dimensionar el flujo y tuberías para este proceso, con la limitante de intentar tener un tamaño lo más reducido posible.
- Estudio del dopaje adecuado de sustancias para la excitación de los sensores: En función del tipo de muestra es necesario determinar mediante experimentación y diseño de experimentos la estimulación correcta para activar a los sensores. El dopante debe estar en la cantidad correcta para su estimulación y el tiempo necesario para no afectar a los sensores y la predicción. (Busto, 2011)
- Análisis de la respuesta de los sensores: Uno de los puntos clave es imitar la funcionalidad del cerebro para la toma de decisiones. Para ello es crucial establecer un modelo que permita diferenciar una sustancia de otra ya sea de forma cualitativa o cuantitativa (Palacios, 2007).

1.1.1 Historia de Narices Electrónicas

Desde hace mucho tiempo la humanidad ha desarrollado elementos, equipos y tecnología que le permita imitar diversas funciones del cuerpo humano. “¿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 olor, 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.” (Graham Bell, 1919). Aproximadamente 50 años transcurrieron hasta que se retomaron los estudios de olfato artificial.

El uso de narices electrónicas es una tecnología nueva, la cual se ha desarrollado hace no más de 40 años, como preludeo se puede incluir el primer prototipo basado en el sistema olfativo de seres humanos, destacando que fue realizado por Moncrief en el año 1961 pero con la particularidad de que dicho prototipo era netamente mecánico (Mamat & Abdul Samad, 2011). Para 1964 se iniciaron las investigaciones que dieron lugar al concepto actual de nariz electrónica, Wilkens y Hatman en dicho año realizaron el estudio de reacciones redox de moléculas odoríferas en contacto con electrodos (Wilkens & HARTMAN, 1964), en 1965 Dravieks y Totter realizaron el análisis comparativo para variaciones de voltaje para superficies que se mantienen en contacto con moléculas volátiles (Luzuriaga & Balaban, 1997).

La primera nariz electrónica como tal fue desarrollada en Warwick Inglaterra por Persaud y Dodd en 1982 (Rodríguez Méndez, 2001). A principios de los años noventa aparecieron los primeros dispositivos comercializables por Alpha MOS de Francia, Neotrics Inc. de Inglaterra y AromaScan también de Inglaterra (Rodríguez Méndez, 2001). En la actualidad las narices electrónicas son sistemas que continúan desarrollándose dependiendo de las diversas aplicaciones de la misma.

1.1.2 Aplicaciones de las narices electrónicas

En la actualidad la nariz electrónica es una herramienta diseñada para el análisis de diversos aromas, sus principales aplicaciones se realizan en industrias que incluyen la agricultura, biomédica, cosméticos, medio ambiente, alimentación, fabricación de productos diversos de uso diario, aplicaciones militares, industria farmacéutica, entre otras.

El olfato es un elemento fundamental en el desarrollo para las industrias que utilizan el aroma de diversos productos para poder garantizar su calidad, consistencia, o simplemente como un método para proveer de un valor agregado, entre los productos que requieren el análisis del aroma están vinos, mariscos, perfumes, elementos que puedan atentar contra la seguridad de los seres humanos como explosivos e incluso estupefacientes.

El estudio de receptores olfativos para detectar diversos aromas se intensifica a medida que pasa el tiempo, debido a las incontables aplicaciones que el uso de narices electrónicas puede proveer a diversos campos industriales, en especial aquellos donde el criterio del ser humano era el único sustento para poder predecir la calidad de un producto o la presencia de un elemento ilegal.

En la actualidad la aplicación de narices electrónicas se puede encontrar en varios campos industriales, entre ellos los más importantes se mencionan a continuación:

- **Industrias Alimenticias:** Las narices electrónicas son utilizadas como un método para medir la calidad de ciertos productos, es decir las mismas reemplazan a los catadores humanos, y de esta manera disminuyen los tiempos de respuesta incluso mejorando los resultados en ocasiones (Criado, 2005).

Entre las aplicaciones de las narices electrónicas en el campo alimenticio se encuentra: la inspección de alimentos por olores, el control del proceso de fermentación de algunos productos, la vigilancia de alimentos y bebidas por olores y la clasificación e inspección de whisky (Gardner J. W., 2000)

- **Industrias Agrícolas:** El uso de narices electrónicas en las industrias agrícolas está íntimamente relacionado con la industria alimenticia, las aplicaciones van desde el estudio de acidez y otras propiedades previo a la cosecha de algunas frutas (Zhang H., 2008), como la detección de anomalías en la producción de aceites (Szkudlarz, 2008).
- **Ambiente:** En el medio ambiente las narices electrónicas son utilizadas para la identificación de afectaciones en la atmósfera con elementos peligrosos para los seres humanos, en este campo se pueden mencionar aplicaciones como: la identificación de gases emanados por un volcán (Diaz, 2006) y el monitoreo continuo de la calidad de agua potable (Gardner J. W., 2000).
- **Aplicaciones de Seguridad militares:** En las aplicaciones militares ha sido limitado el uso de estas tecnologías, sin embargo se han comenzado a aplicar narices

electrónicas en la detección de sustancias ilegales así como drogas y algunos explosivos (E-Nose, 2014).

1.1.3 Sensores Químicos

El componente receptor de un sensor químico transforma selectivamente determinada información química, contenida en una muestra, en una forma de energía susceptible de ser medida. La Unión Internacional de Química pura y aplicada ha dado pautas concretas para clasificar los sensores químicos, según el Mecanismo de transducción en: Dispositivos ópticos, electroquímicos, eléctricos, sensibles a la masa, magnéticos, termométricos y radiométricos (Gomez & Alegret, 1997)

A los sensores químicos se los puede clasificar en 2 grandes grupos: simples y complejos. Los sensores químicos simples son los que utilizan cuando una variedad de fenómenos de reacciones químicas afectan directamente una característica de medida eléctrica tales como la resistencia, la tensión, la corriente o la capacitancia. Los sensores complejos son los que requerirán alguna forma de transducción para obtener la señal eléctrica que se necesitará en las siguientes etapas electrónicas. Los fenómenos indirectos incluyen cambios en la forma física, cambios de frecuencia, modulación de la luz, cambios de temperatura e incluso cambios de masa (Moreno & Caballero, La Nariz Electrónica: Estado del Arte, 2009)

Los sensores más utilizados en narices electrónicas son los sensores de óxido metálico (MOS). Los sensores MOS mejor conocidos como sensores de gas de óxido de metal, es el grupo más investigado de los sensores de gas. Además, son bien cotizados en el campo de sensado de gas bajo condiciones atmosféricas; debido a su bajo costo y flexibilidad de producción, simplicidad de uso y un gran número de gases que se pueden detectar (Wang & Yin, 2010)

La interacción reversible del gas con la superficie del material, es una característica de un sensor de gas de óxido de metal. Esta reacción puede ser influenciada por varios factores, que pueden ser causas internas o externas, como una propiedad natural de los

materiales bases, las superficies y microestructuras del sensado de capas, aditivos de superficies, temperatura y humedad.

Los sensores de gas de óxido de metal son adaptables para detectar combustible o gases oxidantes a través de la medición de conductividad. Como muestra en la **Figura 1**, cuando las moléculas de oxígeno O_2 son absorbidas en la superficie del óxido metálico, estas extraen electrones de la banda de conducción “ E_C ” y atrapan electrones a la superficie en forma de iones. (Wang & Yin, 2010)

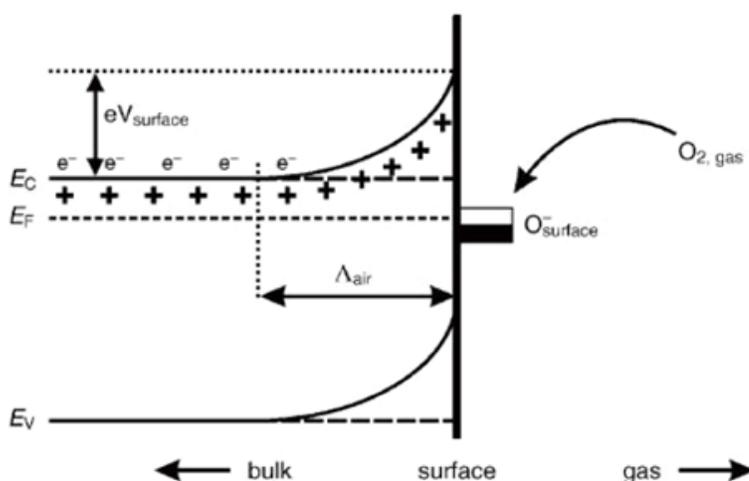


Figura 1 Funcionamiento sensor MOS

Fuente: (Wang & Yin, 2010)

1.1.4 Sistemas de toma de muestras en Narices Electrónicas

Todos los sistemas de nariz electrónica existentes en el mercado se conforman de 3 partes. La primera se enfoca en el sistema de toma de muestra que a partir de las características de volatilidad, se fundamentará en la técnica del espacio de cabeza (headspace) estático. La segunda es el sistema de sensores que medirá las diferentes propiedades físico-químicas de los componentes del aroma, convirtiendo el olor en la señal medible. En la tercera etapa un ordenador se encarga de procesar la sustancia mediante técnicas químio métricas, proporcionando un gráfico que representa la huella

digital de dicho olor. De esta manera, toma de muestra, conjunto de sensores y sistema de tratamiento de datos serán las partes fundamentales de cualquier tipo de nariz electrónica comercial. (Busto, 2011)

El trayecto de la señal en la nariz electrónica, se inicia en la etapa de transporte del olor y cabeza de columna, la cual puede ser Headspace Sampling o Sampling Bag. El “muestreo de cabeza de columna” (headspace) es uno de los métodos de muestreo más utilizados. Es el método que se utiliza para la obtención de componentes volátiles de la muestra y su transporte hacia el sistema de sensores. Estas técnicas se basan en la generación de una fase de vapor (espacio de cabeza) en equilibrio con la muestra, ya sea sólida o líquida. La cabeza de columna consta de componentes volátiles propios de la muestra original, por lo que puede considerarse como una representación confiable de la composición aromática de la sustancia a analizar.

En el caso del sistema Sampling Bag, el vapor es generado después de que una muestra líquida se inyecte en una bolsa especial por una jeringuilla, y luego se evapore. Este vapor es succionado por una bomba e introducido en un sensor. (Moreno & Caballero, La Nariz Electrónica: Estado del Arte, 2009). Para el correcto funcionamiento de una nariz electrónica, es necesario un sistema de inyección de gases reproducible y de gran precisión. Además, se requiere de un sistema que permita coger muestras de la sustancia a analizar. (Rodríguez Méndez, 2001)

1.1.5 Dopaje de muestras en narices electrónicas

El dopaje de muestras se refiere a la alteración de una muestra determinada mediante la adhesión de un estimulante químico con la finalidad de obtener los volátiles de dicha muestra y excitar fácilmente los sensores para un análisis eficaz (Merino, 2013). En los últimos años se han desarrollado diferentes tipos de sensores químicos esto con la finalidad de determinar la presencia y cantidad de elementos volátiles, todos los sensores antes mencionados muestran interacciones físicas y químicas, sin embargo algunos

sensores necesitan su previa excitación para poder identificar algún volátil. (Quicazán, Díaz, & Zuluaga, 2011)

Para que los sensores de óxido metálico actúen de una forma adecuada y con una mayor eficiencia se utilizan algunos tipos de dopaje, existen una gran diversidad de métodos de dopaje para muestras: Impregnación, sol-gel, pulverización catódica y evaporación térmica; estos métodos han sido utilizados para introducir aditivos de metales nobles en los semiconductores oxidantes. Existen varios métodos para poder obtener diferentes estados de dopaje, la mezcla de partículas de metales nobles y óxidos de metal pueden ser obtenidos por el método sol-gel. La pulverización o evaporización termal permiten la modificación del óxido de metal por partículas de metal noble en la superficie del sensor. (Granados, 2016)

1.1.6 Sistemas de Control en narices electrónicas

Para el diseño de narices electrónicas son importantes los sensores de recepción de partículas aromáticas, dichos sensores comúnmente son sensibles a cambios en el medio ambiente, por lo que es conveniente aislarlos en una cámara que no tenga contacto con el exterior, también se debe considerar que la humedad y temperatura afecta considerablemente la repetitividad de los sensores; el control en narices electrónicas está directamente relacionado con la humedad y temperatura de la cámara de sensores para disminuir los efectos mencionados anteriormente en todo el sistema.

El proceso para identificación de aromas está compuesto por 3 partes fundamentales, el primero es la limpieza del equipo de medición, el segundo es tomar las partículas de muestra, y el tercero es la limpieza final del sistema de toma de muestras con “aire limpio”. La estabilización de los sensores es fundamental para que las mediciones no desemboquen en errores, debido a que la medición es afectada directamente por la variación en humedad, es por esto que se deben comparar resultados en condiciones de humedad y temperatura normalizada.

Como se ha mencionado con anterioridad es necesario un sistema de control de temperatura para evitar complicaciones en las mediciones con respecto a la sensibilidad de los sensores, es por esto que el control de temperatura se aplica en narices electrónicas. A continuación en la **Figura 2** se muestra un ejemplo de sistema de control en lazo cerrado para controlar temperatura y humedad en la cámara de sensores.

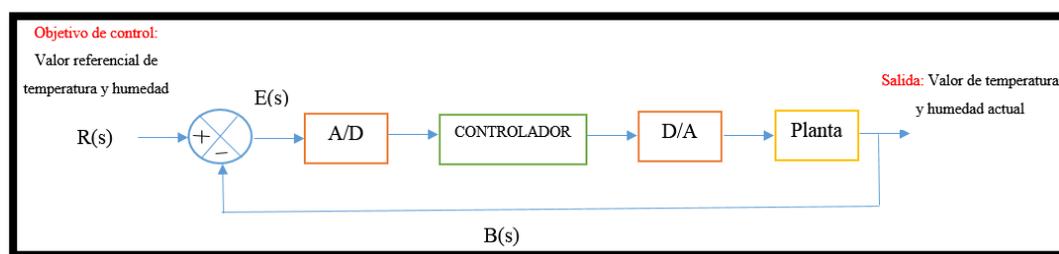


Figura 2 Diagrama de bloques sistema de control de temperatura y humedad

1.1.7 Trabajos Previos

En un estudio previo alumnos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE realizaron los primeros diseños de una nariz electrónica para aplicaciones militares, enmarcado en el proyecto de investigación titulado “Localización de TNT y pólvora en base doble a través de sensado químico usando robótica cooperativa” (López Hernández, 2016). Dicho dispositivo preliminar utiliza sensores de óxido metálico semiconductor 4x2, las sustancias explosivas son dopadas manualmente con alcohol, una cámara experimental de sensores sin ningún análisis previo, y adquisición de datos por medio de una tarjeta conectada a un software de procesamiento.

Con estos diseños experimentales se lograron resultados positivos hasta de un 70% de exactitud en discriminación de sustancias explosivas según (López Hernández, 2016). Sin embargo dicho prototipo se realizó de manera experimental por lo que no toma en cuenta la portabilidad del dispositivo; de hecho el dispositivo solo puede ser usado en una mesa de laboratorio. No se realizó un estudio de flujo y análisis neumático de respiración, no incluye un sistema de control para la temperatura y humedad por lo tanto no se lo puede

usar en cualquier ambiente, además no se realizó un estudio para los materiales de la cámara.

Por lo tanto el enfoque del presente proyecto es modificar el prototipo actual de manera que este pueda ser portable, que funcione en condiciones reales y no como un equipo de laboratorio. Además se realizará un análisis de materiales y geometría del prototipo, también un estudio de la respiración adecuada del dispositivo y la introducción de un sistema de control de temperatura y humedad en la cámara de sensores; todo esto con la finalidad de que el proyecto de investigación previo sea utilizado en aplicaciones militares reales y que proporcione un aporte científico al país principalmente en Seguridad Nacional.

1.2 Justificación e Importancia

En la actualidad en Ecuador se lleva a cabo un plan de seguridad interna en el cual se busca el trabajo cooperativo en diversas ramas como son la Policía nacional y las Fuerzas Armadas del Ecuador, dicho trabajo se convierte en exhaustivo y difícil cuando no existen los recursos suficientes para poder identificar objetos que puedan provocar un atentado a la seguridad Nacional, es así que ante dicho antecedente en el Ecuador se desarrollan diversas estrategias de prevención de tráfico ilegal de componentes explosivos. (Ministerio de Coordinación de Seguridad, 2013)

En los últimos años en el Ecuador se ha incrementado considerablemente los métodos para la detección de explosivos y armamento ilegal; sin embargo en algunas ocasiones dichos métodos tradicionales como son la utilización de canes y equipo entrenado puede llegar a tener un costo elevado, limitando su aplicabilidad. Según estudios realizados por el Ministerio de Defensa y el Departamento de Control de Armas, el explosivo más propenso al contrabando en el Ecuador es la pentolita, que está compuesta por un 50% de Trinitrotolueno (TNT) y un 50% de pentrita (Departamento de Control de Armas de las FFAA, 2015). Así mismo es importante saber que el Trinitrotolueno y la pólvora en base

doble son los componentes fundamentales para los explosivos y municiones que más trafica o usa ilegalmente el Ecuador.

El desarrollo tecnológico permite en la actualidad un control sofisticado, seguro y confiable de varios elementos que atentan considerablemente a la salud de los seres humanos, varios de estos nuevos métodos son capaces de detectar TNT y otros explosivos de manera eficaz, sin embargo, los aparatos disponibles, tales como los detectores de captura de electrones, los espectrómetros de masas y los lectores de rayos X, son sumamente sofisticados y caros, y requieren la presencia de personal capacitado para la realización de los análisis, es por esta razón que como alternativa surge la opción de desarrollar nuevos métodos como son la cromatografía y el estudio de sensores electroquímicos (Alisson, 2014), estos últimos relacionándose considerablemente con un sistema nuevo denominado nariz electrónica, en este se destaca su facilidad de su operación y mantenimiento, el nivel de seguridad en su uso.

El presente trabajo tiene como objetivo continuar con la línea de investigación de Seguridad y Defensa poco desarrollada en el Ecuador. El estudio y desarrollo de dispositivos sensoriales para la percepción de olores artificiales está basado en el Proyecto de Investigación “Localización de TNT y pólvora de base doble a través de sensado químico en un entorno controlado mediante robótica cooperativa. (SmellRobSense) ”, Dicho proyecto se encuentra en fase de experimentación como se observa en la **Figura 3**.

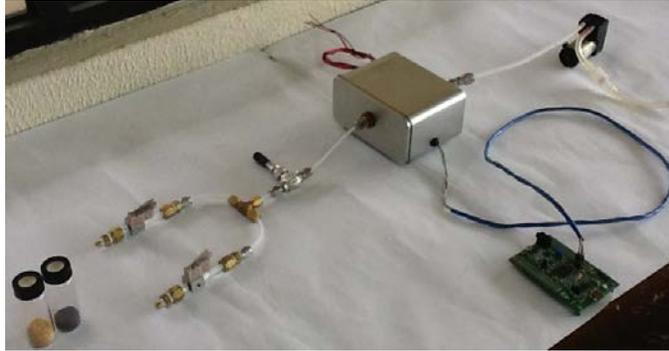


Figura 3 Dispositivo actual SmellRobSense

Fuente: (López Hernández, 2016)

En el proyecto se propone desarrollar un dispositivo portable que pueda ser utilizado fácilmente en cualquier ambiente, posea un control de temperatura y humedad, se realice un estudio de materiales para la cámara de sensores, desarrolle un método de dopaje de sustancias automático y se analice una forma eficaz de respiración artificial para el dispositivo por medio de un análisis neumático; todo con la finalidad de que el sistema sea robusto pueda ser utilizado en cualquier condición, en especial en aplicaciones militares.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Potenciar y Optimizar un dispositivo de nariz electrónica que detecta Trinitrotolueno (TNT) de uso militar.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar los materiales y la geometría de la cámara de sensores con la finalidad de seleccionar aquellos que no afecten considerablemente a la predicción de olores de los mismos

- Diseñar e implementar un sistema de control para temperatura y humedad de la cámara de sensores con la finalidad de que el dispositivo funcione correctamente en cualquier ambiente.
- Desarrollar un sistema de dopaje automático con sistemas hidráulicos que facilite la excitación de los sensores por medio de la adhesión de una sustancia química para que la lectura pueda realizarse en un ambiente real.
- Desarrollar un sistema eficiente de respiración de la nariz electrónica para la adquisición de muestras mediante la utilización de sistemas neumáticos.

1.4 Descripción de proyecto

En el proyecto se propone desarrollar un primer dispositivo portable, simplificado y controlado a cualquier temperatura y humedad, capaz de reconocer y clasificar sustancias relacionadas con explosivos como son el Trinitrotolueno (TNT) y la pólvora en base doble, enmascaradas en otros objetos. El dispositivo se encuentra conformado por sensores químicos de óxido metálico y un estudio desarrollado en base de los materiales adecuados, para la elaboración de la cámara de procesado, actuadores y sensores que contribuyen con el control de temperatura y humedad del dispositivo.

Para la realización del proyecto se tomarán en cuenta los siguientes capítulos:

- **Capítulo 2:** Análisis de Materiales para la cámara de sensores de la nariz electrónica.

Se realizará una investigación previa de las diferentes propiedades de los materiales que debe tener la cámara de sensado para que los cambios en el entorno no interfieran con la correcta adquisición de datos. Además se realizará una matriz de selección para escoger un material adecuado de acuerdo con los conocimientos de Tecnología de los Materiales. Además se realizará el diseño del armazón que contará con una estructura externa adecuada tomando en cuenta la aplicación del dispositivo, con la finalidad de integrar todos los componentes de la nariz electrónica y obtener un equipo portable y robusto. El

diseño se realizará mediante el estudio de resistencia y mecánica de materiales, así como simulaciones en software CAD en SolidWorks.

- **Capítulo 3:** Diseño e Implementación de un sistema de control para temperatura de la cámara de sensores.

Para esta parte del proyecto, se realizará el estudio de la temperatura ideal para la adquisición de señales en los sensores de gas. Posterior a esto se seleccionará el sensor de temperatura adecuado y actuadores para el control respectivo. Una vez escogidos el sensor se deberá realizar el diseño del controlador para la cámara con todos los componentes mencionados anteriormente en el software Software de análisis matemático.

- **Capítulo 4:** Análisis de transferencia convectiva de masa para la implementación de un sistema de dopaje automático.

Se debe realizar un estudio del tiempo de duración de la sustancia de dopaje que se agrega en la muestra para la excitación de los sensores, de esta manera se incluirá un sistema para suministrar dicha sustancia de manera automática cuando el dispositivo lo requiera.

- **Capítulo 5:** Análisis de mecánica de fluidos para la implementación de un proceso de respiración óptimo del dispositivo

Se realizarán estudios para seleccionar el tiempo adecuado de captación de muestras mediante la respiración del dispositivo con su sistema neumático, para esto es correcto realizar varias pruebas de adquisición de datos y su análisis. En este apartado se dimensionara uno de los componentes principales para el proceso de respiración como es la bomba de inyección de muestra y además se analizarán los efectos del cambio de diámetros en el sistema.

- **Capítulo 6: Resultados**

En esta parte del proyecto se describen los resultados finales posterior al procedimiento de experimentación, es decir se resume la aplicación de las teorías y decisiones tomadas en los capítulos anteriores. Los resultados obtenidos con el prototipo finalizado proveen de un panorama claro para analizar las conclusiones acerca del funcionamiento de la nariz electrónica potenciada.

- **Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones**

En este capítulo se muestran las conclusiones acerca de los objetivos principales del trabajo final basándose en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, es decir un análisis si se logró potenciar y optimizar un dispositivo de nariz electrónica que detecta Trinitrotolueno (TNT) y pólvora base doble de uso militar y el procedimiento para lograrlo; además en el apartado de recomendaciones se describirán los trabajos posteriores que deben ser realizados para un mejor funcionamiento de la nariz electrónica desarrollada, además de aplicaciones útiles que se le puede dar al mismo proyecto.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE MATERIALES PARA LA CÁMARA DE SENSORES

En el presente capítulo se realiza la selección de materiales para la cámara de sensores para lo cual, se consideró el método de selección tradicional donde se especifican diversos tipos de posibles materiales en base al estado del arte de narices electrónicas.

2.1 Estado del Arte

Los sensores usados en narices electrónicas suelen ser ubicados en una cámara cerrada con la finalidad de que las partículas de gas se concentren en un espacio y se facilite la adquisición de datos. (Moreno & Serracín, Matriz de sensores: Fundamentos de la nariz electrónica, 2016). El motivo fundamental para incorporar una cámara de sensores se debe a poder obtener concentraciones de los volátiles de la sustancia de forma sencilla y poder realizar la adquisición de datos de manera adecuada. El material que debe usarse para esta cámara de concentración debe ser escogido cuidadosamente para evitar pérdida de información en las lecturas de los sensores. (Brezmes, 2002).

Los materiales comúnmente utilizados en la construcción de cámaras de concentración o sensores en las narices electrónicas, varía dependiendo de la necesidad que va a cubrir el dispositivo o el ambiente en el que se va a desenvolver, en algunos casos puede utilizarse un polímero como plástico ABS de impresión en 3D o PET (Staymates, y otros, 2016), en otros casos el material utilizado puede ser vidrio o cerámica (Moreno & Serracín, Matriz de sensores: Fundamentos de la nariz electrónica, 2016), incluso se pueden utilizar materiales biodegradables como la madera o polímeros especiales (Rodríguez Gamboa, & Durán Acevedo, 2008), así también los metales pueden ser utilizados dependiendo de las necesidades que se deseen cubrir en el dispositivo. En varias narices electrónicas los metales predominan las cámaras de concentración debido a su capacidad inodora y su común disponibilidad a nivel mundial (J.Lozano, y otros, 2013).

2.2 Selección de materiales mediante método tradicional

Para la selección de material de la cámara de sensores se utilizará el método tradicional o también conocido como Materiales de Ingeniería de partes similares. El método tradicional sirve para seleccionar un material adecuado donde el diseñador elige un material en base a la experiencia de partes que tienen un funcionamiento similar y que han demostrado un buen desempeño y resultados (Blanco, 2004), este método toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Un material utilizado en condiciones similares y ensayadas previamente provee seguridad al diseñador.
- Las características fundamentales del material que se ha utilizado previamente ya han sido estudiadas y por tanto no es necesario la realización de otros análisis previo a la selección.

El proceso de diseño por el método tradicional se lista a continuación:

- Definición del problema: expresar los requisitos de diseño como las limitaciones y objetivos.
- Selección materiales utilizados en aplicaciones similares: eliminar los materiales que no pueden hacer el trabajo.
- Apoyo a la información: explorar el ranking de los mejores candidatos.
- Definir características importantes para selección de material: describir las características que se deben tomar en cuenta para la selección del material

A continuación se indican los parámetros que fueron necesarios para el diseño metodológico de la selección de material, dichos parámetros han sido obtenidos de la bibliografía para selección de material, en ellos se detalla la definición del problema, los materiales comúnmente utilizados en narices electrónicas, los materiales poco convencionales en narices electrónicas y las consideraciones necesarias para la selección del material de una nariz electrónica. (González & Mesa, 2004)

- Definición del problema:
 - Función: (¿Qué es lo que el componente hace?) La cámara de sensores contiene el circuito de la matriz de sensores y se encarga de recibir y almacenar el flujo con la sustancia a estudiar y encerrarla para que los sensores puedan realizar la lectura de la misma.
 - Objetivo: (¿Qué condiciones esenciales debe cumplir?) El componente no debe absorber sustancias ni olores y debe estar sellado de manera que la sustancia a analizar no sea contaminada por agentes externos.
 - Limitantes: (¿Qué es lo que se debe limitar o maximizar?) Disponibilidad del material en el mercado, facilidad de manufactura del material a utilizar, costo del material, el material debe ser robusto, no frágil.
 - Variables libres: (¿Qué variables son libres para la elección del material?) Dimensiones de la cámara de sensores, dureza del material.

- Materiales no utilizados en aplicaciones de narices electrónicas:

Los materiales no utilizados en aplicaciones de narices electrónicas son determinados por la bibliografía mostrada en el estado del arte y son aquellos materiales que nunca se han usado o se han usado pero no son ideales para la aplicación, dichos materiales se detallan a continuación:

- Cerámicos: Es un material frágil y no comúnmente utilizado en aplicaciones de narices electrónicas.
 - Materiales compuestos: Son difíciles de conseguir en el medio y escasamente utilizados en aplicaciones de narices electrónicas.
- Materiales comúnmente utilizados en cámaras de sensores de narices electrónicas

Los materiales utilizados se toman principalmente de aplicaciones antes desarrolladas y funcionales, en su mayoría se explicaron en el estado del arte, esto se realiza con la finalidad de conocer que materiales han sido considerados ideales en aplicaciones reales.

- Madera: Dependiendo el tipo de madera posee ciertos beneficios como su robustez, disponibilidad en el mercado y facilidad de manufactura, la madera comúnmente utilizada en aplicaciones de narices electrónicas es la del ceibo. (Rodríguez Gamboa, & Durán Acevedo, 2008)
 - Polímeros: Son robustos, herméticos, disponibles en el mercado y tienen facilidad de manufactura. (Staymates, y otros, 2016)
 - Metales: Son herméticos, disponibles en el mercado, robustos y tienen facilidad de manufactura, los metales comúnmente utilizados en aplicaciones de narices electrónicas son los aceros. (J.Lozano, y otros, 2013)
 - Vidrio: Es hermético, no absorbe partículas del exterior, aunque es muy utilizado en aplicaciones de narices electrónicas en la aplicación que se realizó no es recomendable debido a su fragilidad y difícil manufactura. (Moreno & Serracín, Matriz de sensores: Fundamentos de la nariz electrónica, 2016).
- Características importantes para la selección del material de la cámara de sensores de la nariz electrónica:

Las características para la selección del material fueron determinadas por las necesidades mostradas en la **Tabla 1** que se desean mejorar del prototipo inicial y se describen a continuación:

Tabla 1
Identificación de necesidades para el material de la
cámara de sensores

NECESIDAD	PROTOTIPO INICIAL
La cámara de sensores debe poseer hermeticidad total.	Existió hermeticidad en un 80%
El material de la cámara de sensores debe ser inodoro	El material de la cámara de sensores no fue analizado.
El tamaño de la cámara de sensores debe ser reducido para garantizar su limpieza.	El tamaño es grande en comparación a la matriz de sensores.

Para entender el proceso en este diseño se describen las propiedades mecánicas que debe cumplir el material para solventar las necesidades de la **Tabla 1**.

- **Robustez:** Se refiere a la resistencia, tenacidad y otras características mecánicas de cada material, para la construcción de la cámara de sensores de la nariz electrónica se requiere un material con alta robustez.
- **Maquinabilidad:** Capacidad de un material para la fácil modificación de su geometría física, para la construcción de la cámara de sensores de la nariz electrónica se requiere un material con alta Maquinabilidad.
- **Costo:** Se refiere al valor monetario al que se adquiere un material por una unidad de medida, por ejemplo peso, para la construcción de la cámara de sensores de la nariz electrónica se requiere un material con bajo costo.
- **Durabilidad:** Se refiere a la resistencia de un material de permanecer inalterable al paso del tiempo, en esta aplicación es necesario mencionar que la cámara de sensores estará sometida constantemente a exposición con etanol y otros elementos que pueden afectar las propiedades del material de la cámara de sensores, para la construcción de la cámara de sensores de la nariz electrónica se requiere un material con alta durabilidad expuesto a etanol.
- **Peso:** es una medida de la fuerza gravitatoria que actúa sobre un objeto, para la construcción de la cámara de sensores de la nariz electrónica se requiere un

material tenga un peso moderado, con la finalidad de que pueda ser utilizado en otro tipo de aplicaciones, por ejemplo móviles.

- Hermeticidad: Es la capacidad de un material para impedir el paso de partículas externas por su espacio físico, para la construcción de la cámara de sensores de la nariz electrónica se requiere un material con alta hermeticidad, debido a que este debe repeler agentes externos que afecten en las mediciones de los sensores a la sustancia a analizar. (Callister, 2003)

La **Tabla 2** muestra el resumen de las características necesarias para la aplicación del material en la construcción de una nariz electrónica, según estos requerimientos hizo una selección de material con parámetros cualitativos.

Tabla 2
Requerimientos selección de material cámara de sensores

PARÁMETRO	REQUERIMIENTO
ROBUSTEZ	Alto
MAQUINABILIDAD	Alto
COSTO	Bajo
DURABILIDAD	Alto
PESO	Medio
HERMETICIDAD	Alto
POROSIDAD	Bajo

En la **Tabla 3** se observa una relación cualitativa entre los materiales utilizados comúnmente para la elaboración de cámaras de sensores en narices electrónicas, dicha relación se realizó con la comparación de algunas características consideradas importantes para el funcionamiento correcto del prototipo a diseñar.

Los parámetros de calificación de conveniencia para la aplicación se han definido por las necesidades del dispositivo, la calificación de cada material y característica mostrada en la **Tabla 3** fue otorgada por el criterio del diseñador.

Tabla 3
Matriz de selección de materiales entre los comúnmente utilizados en las cámaras de sensores de narices electrónicas

	MADERA	POLÍMEROS	METALES	VIDRIO
	(CEIBO)	(PET)	(ACERO)	
ROBUSTEZ	2.5	2.5	5	0
MAQUINABILIDAD	5	2.5	2.5	0
COSTO	5	2.5	2.5	5
DURABILIDAD	2.5	2.5	5	2.5
PESO	5	5	2.5	2.5
HERMETICIDAD	2.5	2.5	5	5
POROSIDAD	0	2.5	5	5
TOTAL	22.5	20	27.5	20

** Se utiliza 0 no conveniente, 2.5 conveniente, 5 muy conveniente

Después del análisis cualitativo realizado anteriormente, los materiales aceptables en relación a alta robustez, alta maquinabilidad, bajo costo, alta durabilidad, medio peso, alta hermeticidad y baja porosidad para la construcción de la cámara de sensores pueden ser madera, metales y polímeros, siendo los metales los más aptos por las características requeridas en este proyecto, sin embargo la clasificación de los aceros es amplia, por lo que se hace necesaria un nuevo análisis para discriminar los diferentes tipos de metales.

Aceros comúnmente utilizados en cámaras de sensores de narices electrónicas

- Acero de bajo % de carbono
- Acero Inoxidable
- Aceros Bonificados

En la **Tabla 4** se observa una relación cualitativa entre los aceros utilizados comúnmente para la elaboración de cámaras de sensores en narices electrónicas, dicha relación se realizó con la comparación algunas características consideradas importantes para el funcionamiento correcto del prototipo a diseñar.

Tabla 4
Matriz de selección de aceros comúnmente utilizados en las cámaras de sensores de narices electrónicas

	ACERO DE BAJO % CARBONO	ACERO INOXIDABLE	ACEROS BONIFICADOS
ROBUSTEZ	2.5	5	5
MAQUINABILIDAD	5	2.5	2.5
COSTO	5	2.5	2.5
DURABILIDAD	2.5	5	2.5
PESO	5	5	5
HERMETICIDAD	5	5	5
POROSIDAD	2.5	5	5
TOTAL	27.5	30	27.5

** Se utiliza 0 no conveniente, 2.5 conveniente, 5 muy conveniente

Por los análisis cualitativos realizados anteriormente, se considera que el material más óptimo para la construcción de la cámara de sensores de la nariz electrónica es el acero inoxidable, por su alta durabilidad en ambientes corrosivos, su porosidad reducida y su alta robustez. Sin embargo se realizaron experimentos con los 3 materiales más utilizados en narices electrónicas que son la madera de ceibo, el acero inoxidable y un polímero como es el plástico, y de esta manera corroborar el análisis realizado en este punto del proyecto.

2.3 Desarrollo Experimental

Para la experimentación respecto a la selección del material adecuado para la construcción de la cámara de sensores de la nariz electrónica, se van a realizar mediciones de la sustancia de prueba (alcohol) con distintos tipos de material en la cámara.

Los parámetros que se tomaron en cuenta para realizar las mediciones se explican en la **Tabla 5**. Y se definen a continuación.

1. Caudal de la bomba de aspiración: Son los litros de aire por minuto que se empujan a través de las mangueras y que es proporcionado por el compresor, cuyos cálculos serán explicados en el capítulo IV del presente trabajo.
2. Volumen de las cámaras utilizadas: Para poder tener una conclusión clara del material se deben utilizar 3 cámaras de sensores, una de acero inoxidable otra de plástico PET y otra de madera ceibo con las mismas dimensiones para poder diferenciar las mediciones que se obtendrán.
3. Tiempo total de respiración: Es el tiempo que toma en total el dispositivo para realizar un proceso de respiración completa que incluye la absorción de la sustancia y la limpieza de la cámara para realizar otro experimento.
4. Tiempo de aspiración de sustancia: Es el tiempo que la cámara de sensores recibe un flujo de sustancia contaminada para realizar una medición.
5. Tiempo de limpieza de la cámara: Es el tiempo que se envía aire limpio a la cámara de sensores con la finalidad de descontaminar los sensores y realizar una nueva medición.
6. Temperatura de la cámara: Es la temperatura a la que se debe encontrar la cámara el momento de realizar las mediciones con la finalidad de no causar cambios en las lecturas que proporcionen los sensores.
7. Humedad relativa de la cámara: Es la humedad relativa del ambiente de la cámara el momento de realizar las mediciones con la finalidad de no causar cambios en las lecturas que proporcionen los sensores.
8. Réplicas tomadas de respiración: Son el número de respiraciones que realizará el dispositivo en cada experimento.
9. Tipos de materiales: Son los materiales aptos obtenidos anteriormente para la elaboración de la cámara de sensores.
10. Tipos de sensores de gas: Son los sensores con los que cuenta la tarjeta para realizar las mediciones y posterior comparación de sustancias analizadas.

Tabla 5
Parámetros para experimentación del material de la cámara de sensores

N°	PARÁMETROS	VALORES
1	Caudal de la bomba de aspiración	1.1 [l/min]
2	Volumen de las cámaras utilizadas	384 cm ³
3	Tiempo total de respiración	120 [s]
4	Tiempo de aspiración de sustancia	30[s]
5	Tiempo de limpieza de la cámara	90[s]
6	Temperatura de la cámara	23° C
7	Humedad relativa de la cámara	32%
8	Réplicas tomadas de respiración	4
9	Tipos de materiales	3 (Madera ceibo, Acero inoxidable, plástico PET)
10	Tipos de sensores de gas	4 (T-GS 822,826,825,2610)

A continuación se explica el procedimiento que se llevó a cabo para la experimentación del material de la cámara de sensores como se observa en la **Figura 4**, para el diseño de los experimentos se tomaron en consideración lo siguiente:

1. Hora del día: en la misma franja horaria del día, desde las 08:00 hasta las 11:30 am.
2. Lugar de experimentación: Laboratorio de Electrónica 4 x 6 m²
3. Cantidad de sustancia constante: 1ml de alcohol
4. Tiempo de experimentación: quince minutos (15 min.), con cuatro réplicas de respiración continua por material.
5. Orden Experimentación: Aleatoria, para evitar el efecto memoria

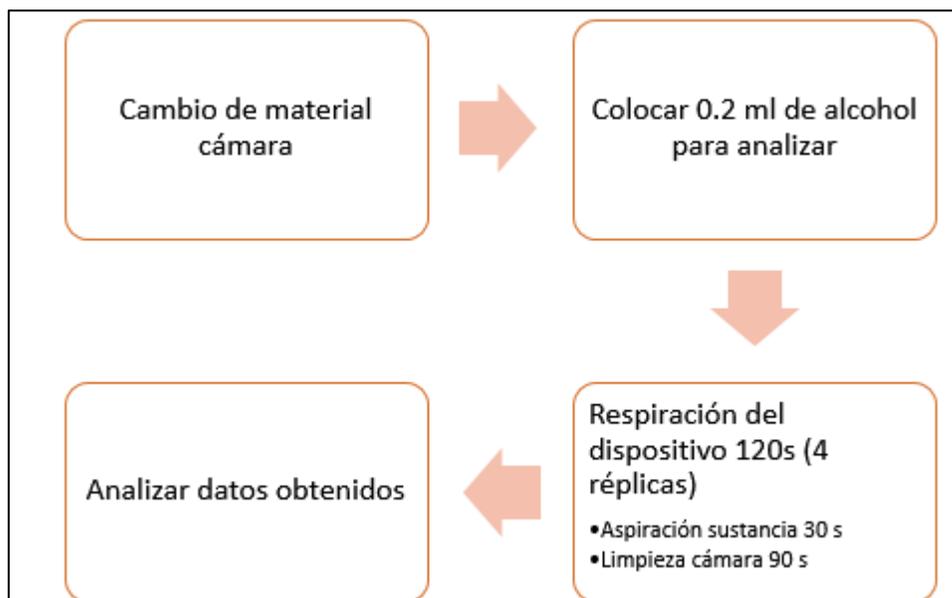


Figura 4 Procedimiento experimentación material cámara de sensores

El proceso experimental para cada tipo de material es el siguiente:

- Se ejecutó la aplicación en java creada para la adquisición de datos.
- Se encendió el sistema 5 minutos antes de la colocación de muestras y el cambio de cámaras de sensores de diferente material.
- Se tomó una muestra de 1 gramos (1gr) de TNT dopada con 1 ml alcohol se coloca en un envase.
- Se coloca el envase en la zona de prueba para su análisis.
- El tiempo que dura cada experimento con 4 réplicas se detalla en la **Tabla 6**.
- Cuando termina el experimento de un material en particular se procede a grabar los datos y guardarlos en un archivo para su posterior análisis.
- El procedimiento se debe repetir con la modificación del material de la cámara de sensores: acero inoxidable, madera de balsa, plástico PET.

Tabla 6
Tiempo de duración experimento por material

SECUENCIA EXPERIMENTO			
PASO	PROCESO	TIEMPO (S)	TIEMPO(min)
0	PREPARACIÓN	300	05:00
1	LIMPIA	90	01:30
2	ABSORBE	60	1
	LIMPIA	90	01:30
3	ABSORBE	60	1
	LIMPIA	90	01:30
4	ABSORBE	60	1
	LIMPIA	90	01:30
5	ABSORBE	60	1
	LIMPIA	90	01:30
6	PROCESAMIENTO	120	02:00
	Tiempo total	1110	14:30

Para la visualización de los resultados se montaron los datos tomados por los diferentes sensores en diferentes cámaras construidas en acero inoxidable, madera de ceibo y plástico PET.

2.4 Resultados

2.4.1 Cálculo del espesor de la cámara de sensores

Previo al análisis de resultados se determinó la geometría de la cámara de sensores, la cual se describe a continuación:

La cámara de sensores, es un elemento hermético, sin embargo este cuenta con un medio de intercambio de fluidos en su parte superior con la finalidad de acelerar el proceso de exhalación o limpieza de la nariz electrónica.

Como es un recipiente que no va a estar sometido a altas presiones se calculó el espesor de acuerdo al peso máximo que a criterio del diseñador se desea para esta parte de la nariz electrónica:

PARÁMETROS	VALOR
L: Longitud	18.8 cm
H: Ancho	14.2 cm
d: Densidad del acero inoxidable	8.0 g/cm ³
m: Peso aproximado deseado	300 gr
e: Espesor de la cámara de sensores	Incógnita

Los diferentes parámetros se basan en las medidas reales de la tarjeta de sensores del prototipo base incluyendo las partes que formarán parte de las paredes de la cámara de sensores.

Para hallar el espesor de la lámina para la construcción de la cámara de sensores, utilizaremos la densidad del material, como se muestra en la **(Ec.2. 1)**.

$$d = \frac{m}{v} = \frac{m}{L * H * e} \quad (\text{Ec.2. 1})$$

Despejando tenemos:

$$e = \frac{m}{L * H * d}$$

$$e = \frac{300}{18.8 \text{ cm} * 14.2 \text{ cm} * 8 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}}$$

$$e = 0.14 \text{ cm} \approx 0.2 \text{ cm}$$

Es decir el espesor de la cámara de sensores fue de 1.9 mm para q la cámara no sobrepase el peso especificado por el diseñador.

2.4.2 Resultados del análisis de material

Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 5** y **Figura 6**. En estas figuras se muestra una representación de las lecturas del sensor 3: T-GS 826 y el sensor 4: T-GS 2610, sometidas a la absorción de TNT dopada con alcohol con cámaras de sensores de

diferentes materiales. Se observa que en la gráfica azul correspondiente a acero inoxidable, existen valores máximos que no se replican en las gráficas gris y naranja que representan las lecturas con una cámara de sensores de madera y de plástico.

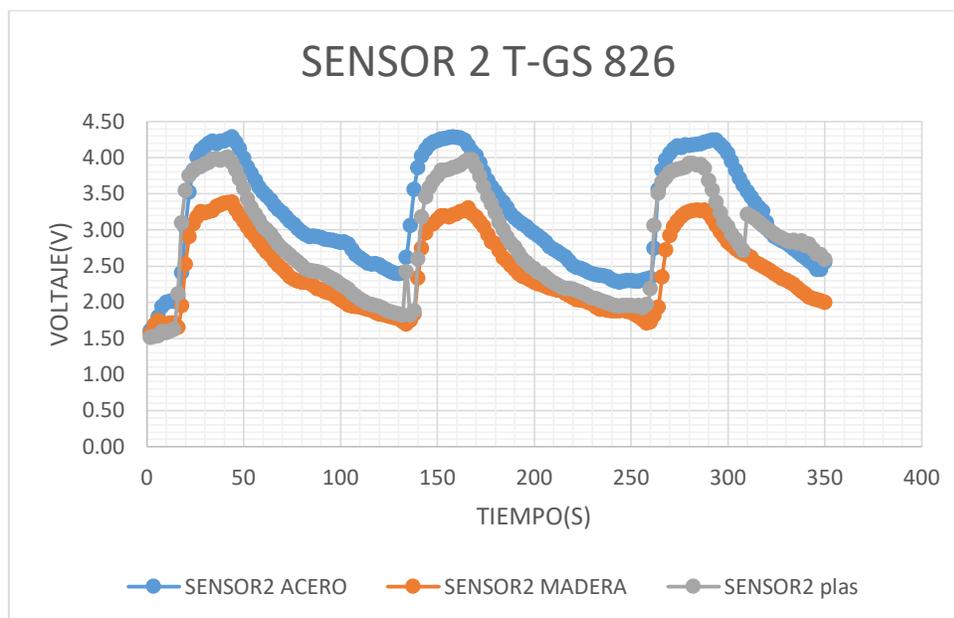


Figura 5 Resultados datos tomados por material en el sensor 2 T-GS 826

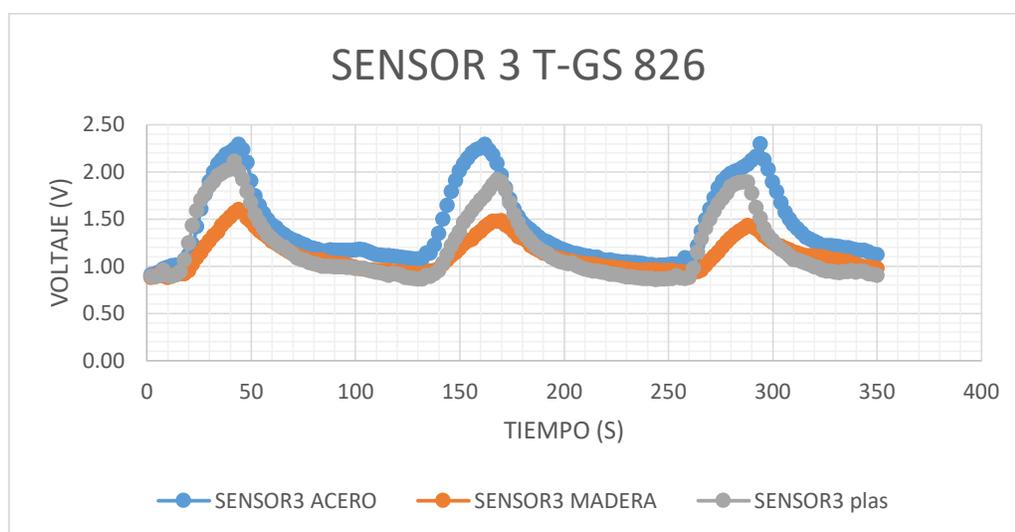


Figura 6 Resultados datos tomados por material en el sensor 3 T-GS 826

En la **Tabla 7** se muestran los parámetros para el estudio experimental de los datos obtenidos por los sensores y una breve explicación de los requerimientos para selección de material.

Tabla 7
Parámetros a analizar en los datos obtenidos por los sensores para la selección del material

Parámetro	Requerimiento
Valor Máximo tomado por el sensor en la primera lectura	El sensor debe tomar un valor máximo cuando empieza la lectura de la sustancia a analizar.
Repetibilidad del valor máximo	El valor máximo al que llegan los sensores debe repetirse en todas las réplicas, el material apto no permitirá pérdida de información en los sensores, siendo 100% la repetición en las 3 réplicas.
Repetibilidad del valor referencia	El valor referencia una vez que se realiza el proceso de limpieza debe ser el mismo siempre a excepción del primer valor, el material apto deberá regresar siempre a una sola referencia, 100% la repetición en las 3 réplicas.

La **Tabla 8** muestra un resumen de cada sensor con las medidas de los parámetros obtenidas en cada caso para el experimento de selección de material.

Tabla 8
Parámetros fundamentales de datos tomados por los sensores en
cámaras de sensores de distintos materiales

Voltaje máximo tomado por el sensor en la primera lectura						
Material	SENSOR 1 TGS-825	SENSOR 2 TGS-822	SENSOR 3 TGS-822	SENSOR 4 TGS-2610	SENSOR 5 TGS-826	SENSOR 6 TGS-822
MADERA (CEIBO)	4.0 (V)	3.3 (V)	1.6 (V)	3.9 (V)	1.9 (V)	3.34 (V)
ACERO INOX	4.9 (V)	4.3 (V)	2.3 (V)	5.0 (V)	2.6 (V)	4.1 (V)
PLÁSTICO (PET)	4.9 (V)	4.0 (V)	2.1 (V)	4.3 (V)	2.5 (V)	3.8 (V)
Repetibilidad del valor máximo						
MADERA (CEIBO)	100%	100%	66.60%	66.60%	66.60%	66.60%
ACERO INOX	100%	100%	100%	100%	100%	100%
PLÁSTICO (PET)	66.60%	67%	33.30%	66.60%	33.30%	33.30%
Repetibilidad del valor referencia						
MADERA (CEIBO)	67%	66.60%	66.60%	66.60%	66.60%	66.60%
ACERO INOX	100%	100%	100%	100%	100%	66.60%
PLÁSTICO (PET)	66.60%	33.30%	100.00 %	33.30%	100.00 %	33.30%

Para efecto de análisis se tomó el sensor 3, donde las variaciones de valor pico, repetición de referencia y repetición de valor máximo son más visibles que en otros sensores, a continuación en la **Figura 7** se muestra una gráfica con los resultados de dicho sensor y su respectivo análisis:

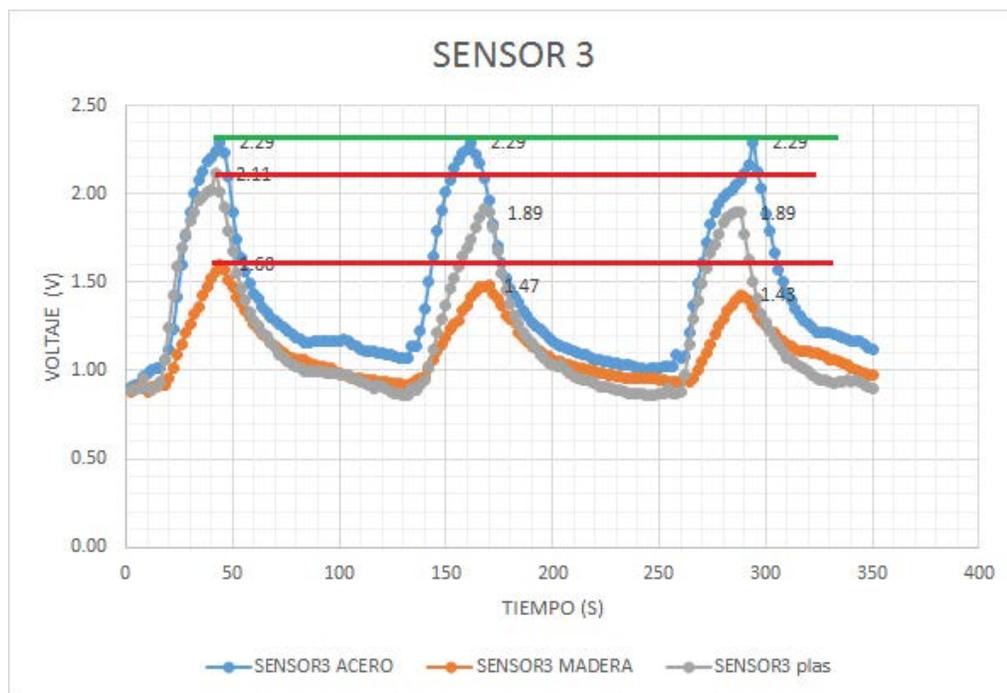


Figura 7 Análisis de parámetros para selección de material en el sensor 3 TGS-822

En la **Figura 7**, se muestra una gráfica con las lecturas del sensor 3 TGS-822 tomadas de la aspiración de TNT dopada con alcohol, en ella se diferencian tres franjas separadas por una línea verde y dos líneas rojas. Las franjas indicadas se separaron por los valores máximos que toman las lecturas del sensor en cada material. La gráfica en azul referente al acero inoxidable toma el valor pico de lectura a 2.29 v, siendo el mayor entre todas las lecturas máximas incluyendo las gráficas de los otros materiales, se observa también que la lectura de la gráfica naranja referente a la madera es la que menor valor toma, esta llega a un valor de 1.6 máximo en su primera replica.

En conclusión la cámara de acero inoxidable cumple con los tres parámetros identificados en la experimentación que son tomar un valor máximo en la primera lectura, repetibilidad del valor máximo y repetibilidad del valor de referencia; además el material escogido cumple con los requisitos de diseño por el método tradicional, cuya solución se muestra continuación:

- Función: La cámara de sensores puede ser construida con un diseño en acero inoxidable para introducir la matriz de sensores y las respectivas entrada y salida de fluido.
- Objetivo: El acero inoxidable no absorbe sustancias ni olores y por sus características químicas de composición permite una alta hermeticidad para evitar la contaminación de su interior por agentes externos.
- Limitantes: El acero inoxidable presenta una dificultad en su maquinado debido a la dureza del material, el costo y la disponibilidad del material en el mercado no representan una limitante.
- Variables libres: Dimensiones de la cámara de sensores, dureza del material.

Por los puntos analizados anteriormente, el acero inoxidable es un material apto para la construcción de la cámara de sensores en este proyecto.

CAPITULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LA CÁMARA DE SENSORES

En este capítulo se realizó el diseño y posterior implementación de un sistema de control de temperatura en la cámara de sensores, con la finalidad de que el dispositivo pueda ser utilizado en cualquier ambiente, sin alterar de manera considerable las lecturas que generen los sensores expuestos a diversas sustancias.

3.1 Sistema de control en narices electrónicas estado del arte

En narices electrónicas que utilizan sensores de óxido metálico (MOS) el calentamiento de los sensores es requerido para una operación efectiva, es por este motivo que un sistema de control de temperatura es fundamental (Arshak, Moore, Lyons , Harris, & Clifford, 2006).

La percepción de sensores de óxido metálico (MOS) de un olor y el efecto de los sensores respecto a un control de calefacción de los mismos se encuentra íntimamente ligado; es por esto que se debe realizar la modificación de temperatura de calefacción en un ciclo cerrado para que el dispositivo pueda ser funcional en cualquier lugar y en cualquier condición ambiental. La aplicación ideal de un control de temperatura es un control tipo proporcional-integral debido a que esta reduce el error en estado estacionario y permite que el objetivo de control llegue a un objetivo de control deseado (Pequeño, 2015).

Las narices electrónicas deben estar diseñadas de tal manera que las mediciones de los olores puedan considerarse confiables, se conoce que la parte más importante de una nariz electrónica es su cámara de sensores donde se concentra la sustancia a ser analizada (J.Lozano, y otros, 2013), donde se concentra la sustancia a ser analizada. Una de las partes importantes para mejorar el prototipo de nariz electrónica existente propone colocar

un sistema de control para poder disminuir los efectos ambientales que modifiquen la temperatura y que perjudiquen la sensibilidad de los sensores.

Para el diseño de un controlador es necesario identificar tres variables cruciales las que se explican a continuación:

- Objetivo de control (referencia): Es una magnitud o condición que varía de forma determinada.
- Variable controlada: Es una magnitud o condición que se mide y se controla. Comúnmente, la variable controlada es la salida del sistema.
- Variable manipulada (Acción de control): Es una magnitud o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Son las entradas del proceso

Además se debe encontrar un modelo matemático que se asemeje al comportamiento de la planta, para realizar los cálculos del controlador respectivo.

Para el proyecto actual se propuso un sistema de control en el cual las perturbaciones externas y los cambios en calibración no proporcionen errores, también se necesitó que las medidas de regulación se modifiquen según observaciones hechas en el proceso, por lo cual se desarrolló un sistema de control en lazo cerrado el cual modifica la temperatura de la planta mediante un proceso de control digital. Un control en lazo cerrado es un sistema que utiliza retroalimentación y vuelve a la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas, dicho sistema se muestra en la **Figura 8**.

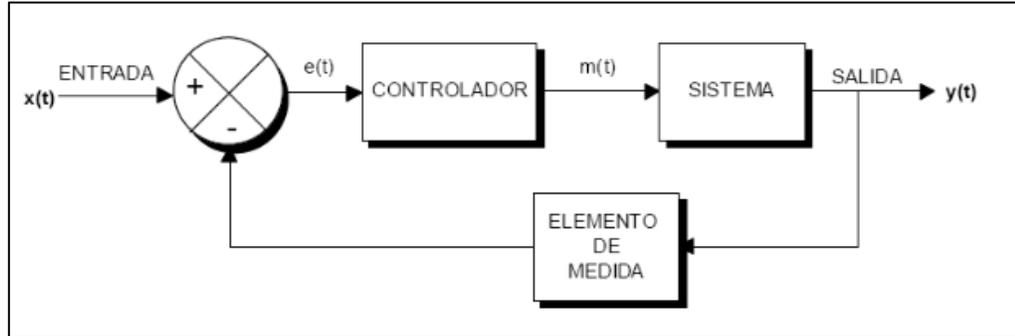


Figura 8 Diagrama de bloques de un sistema de control analógico en lazo cerrado

Fuente: (Sanjuan, 2008)

Un proceso de control digital es la implementación de un sistema de control con la utilización lógica programada mediante una tarjeta de control o un medio computacional, un diagrama de un sistema de control digital se muestra en la **Figura 9**.

La variable de control en el proyecto es la temperatura a la que se encuentra la cámara de sensores, dicha variable se controla al identificar la variación de temperatura del ambiente externo, el controlador regula a cualquier objetivo de control, para ello se considera que la temperatura de la cámara debe ser constante.

3.2 Necesidad de una etapa de control

La necesidad de un sistema de control de temperatura en la cámara de sensores de una nariz electrónica radica fundamentalmente en la sensibilidad que poseen los mismos a cambios de temperatura y humedad, y como consecuencia los errores que se pueden cometer en las lecturas que se realicen.

Cada sensor de gas de la familia Figaro utilizado en el proyecto trae consigo un medio que facilita su calentamiento para recibir de mejor manera las señales, sin embargo existen ocasiones en las cuales debido a las bajas temperaturas externas, dicho sistema no es suficiente para proporcionar a los sensores la temperatura que estos requieren para su

correcto funcionamiento, un ambiente de temperatura controlada favorecerá considerablemente en los datos obtenidos al realizar un proceso de medición de explosivos en una sustancia.

En la **Figura 9** se observa el diagrama de bloques del control digital propuesto, se observa que al ser un sistema de control en lazo cerrado este minimizará considerablemente las perturbaciones externas, además de siempre obtener en la variable controlada un valor deseado.

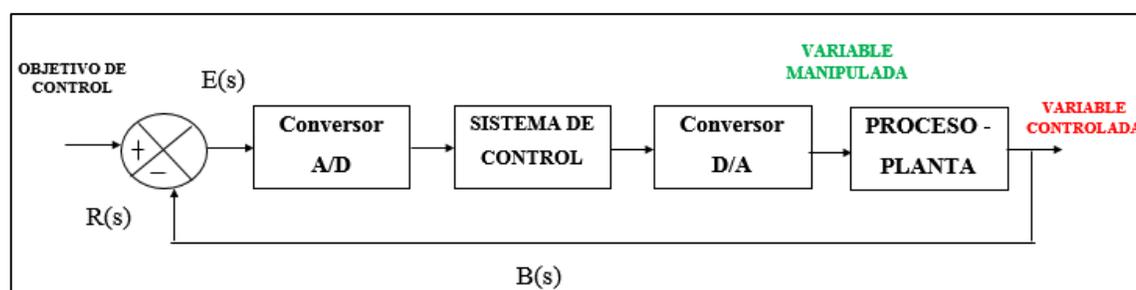


Figura 9 Diagrama de bloques sistema de control general desarrollado

3.3 Requerimientos para el diseño del sistema de control

Para poder implementar el control de temperatura es necesario seleccionar un método de calentamiento de la cámara de sensores, la cámara de sensores es de acero inoxidable, por lo cual es necesario seleccionar un actuador que al tener contacto con cualquier parte de la cámara no actúe como conductor de corriente, sino más bien únicamente de calor.

Se deben colocar actuadores que proporcionen calor a la cámara de manera uniforme, además de que estéticamente no modifiquen la geometría de la misma considerablemente. Para la selección de un sensor adecuado es necesario establecer los parámetros a analizar para que dicho sensor funcione apropiadamente en la aplicación, en la **Tabla 9** se explican los parámetros que servirán para la posterior matriz de selección de sensor.

Tabla 9
Parámetros a analizar en los datos obtenidos por los sensores para la selección del sensor de temperatura

Parámetro	Explicación
Rango de medición	El rango puede estar entre temperatura ambiente y 50°C, debido a que el valor de referencia que se desea obtener en la cámara de sensores no sobrepasa dicho valor.
Costo bajo	Al ser el desarrollo y potencialización de un prototipo existente es necesario reducir al máximo costos en elementos que se incluyan en el nuevo prototipo.
Tiempo de respuesta	La aplicación necesita que el sensor posea un tiempo de respuesta rápido (1-2 s) para un adecuado funcionamiento de la planta.
Tamaño reducido	Al ser la cámara de sensores de tamaño pequeño (120 x 90x 40 cm), se desea que el sensor a colocar no perjudique en mediciones y ocupe el menor espacio posible aproximadamente 0.12 x 0.155 x 0.55cm.
Precisión	El valor requerido es de aproximadamente ± 2 °C ya que la cámara de sensores no se ve afectado por este valor y para que el error en la entrada del controlador sea el menor posible.
Resolución	El sensor debe tener una resolución de 0 a 1 °C debido a que es un valor aceptable en las lecturas que deben entrar al controlador.

3.4 Selección de actuador y sensor

3.4.1 Actuador

Uno de los materiales que funcionan como conductores de calor y no de corriente es la cerámica, una resistencia de potencia es un elemento cerámico que puede ser calentado mediante un circuito de potencia al modificar voltaje o corriente.

El valor de la resistencia se determina con las ecuaciones (Ec. 3. 1) y (Ec. 3. 2) donde la tensión es 110 V, se tomó en cuenta que las resistencias no deben sobrepasar la potencia de 10 Watts otorgada por fabricantes para evitar el daño del componente o un daño en la alimentación del sistema.

$$P = V \times I \quad (\text{Ec. 3. 1})$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10 \text{ watts}}{110 \text{ v}}$$

$$I = 0.090 \text{ A}$$

$$V = I \times R \quad (\text{Ec. 3. 2})$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{110}{0.090}$$

$$R = 1222 \Omega = 1.2 \text{ K}\Omega$$

El valor de resistencia para provocar un calentamiento de la misma sin efectuar daños en el elemento, es de 1.2 K Ω a 10 watts y con una alimentación de 110 V en corriente alterna.

La resistencia de 1.2 K Ω a 10 watts considera una situación extrema donde no debe saturarse la corriente, entonces se tomó como valor una resistencia mayor de 1.5 K Ω , al recalcularse la corriente y la potencia se obtienen los siguientes resultados:

$$I1 = \frac{110}{1500} = 0.073 \text{ A} \quad (\text{Ec. 3. 2})$$

$$P1 = V \times I = 8 \text{ watts}$$

Como se observa en la **Figura 10**, se colocaron dos resistencias de potencia para provocar el calentamiento de la cámara de sensores, el motivo de colocar dos elementos

se debe principalmente al tamaño reducido de la cámara, mientras que la disposición lateral se debe a la uniformidad de calentamiento que debe tener la cámara para su funcionamiento eficiente.

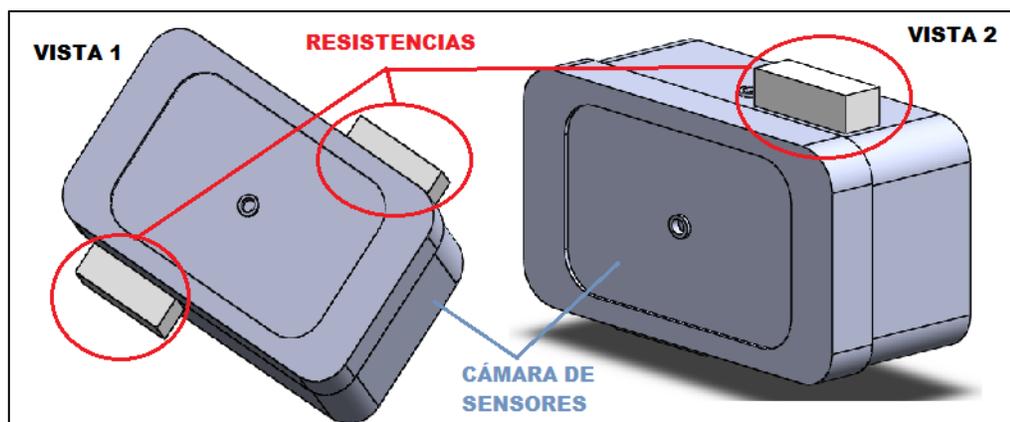


Figura 10 Esquema de ubicación de resistencias para control de temperatura

Como se deben colocar dos resistencias para poder garantizar la homogeneidad de calor en toda la cámara se procede a calcular con la (Ec. 3. 3) la corriente total en el circuito suman las corrientes de cada malla como se observa en la **Figura 11** teniendo como resultado:

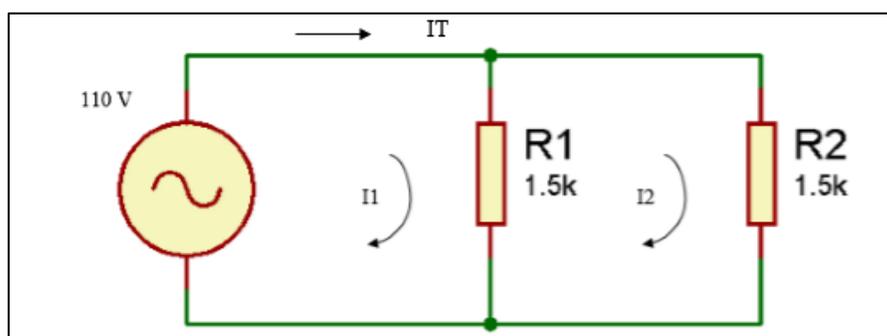


Figura 11 Circuito utilizado para los actuadores del sistema de control

$$I_T = I_1 + I_2 = 0.15 \text{ A}$$

(Ec. 3. 3)

Como se puede observar el valor de la corriente total es mínimo y puede ser obtenido directamente de la fuente que proporciona los 110 v AC. Los valores de resistencia de 1.5 K ohm son los ideales para la aplicación.

3.4.1.1 Acondicionamiento del actuador

El diseño del acondicionamiento del actuador tomó en cuenta un circuito de potencia de manera que los 110 V calienten las resistencias cuyo valor fue obtenido en la (Ec. 3. 2) y se realice un control, como acondicionamiento del actuador se utilizó un PWM (pulse-width modulation).

En la **Tabla 10** se muestra una matriz de selección con diversos parámetros que debe cumplir el control de potencia en Ac estos parámetros tomaron en cuenta el criterio propio de diseño.

Tabla 10
Matriz de selección circuito de control de potencia

	Tiristor y MOC	Circuito Dimer DIAC	Dimmer pre- fabricado	Circuito con Relé
Capacidad de modificar voltaje AC mediante voltaje DC	5	5	2.5	5
Costo bajo	5	2.5	0	5
Facilidad de implementación	5	2.5	5	5
Compatibilidad con PWM	5	2.5	2.5	0
TOTAL	20	12.5	10	15

** Se utiliza 0 no conveniente, 2.5 conveniente, 5 muy conveniente

Por los resultados obtenidos en la **Tabla 10** se plantea que el circuito de control de potencia se debe hacer mediante un circuito tiristor y MOC, en la **Figura 12** se muestra un circuito utilizado comúnmente en etapas de potencia con tiristor y MOC, las (Ec. 3. 4), (Ec. 3. 5) y (Ec. 3. 6) muestran las principales variables que se calcularon, adicionalmente se incluyen una resistencia y un condensador a la salida por seguridad.

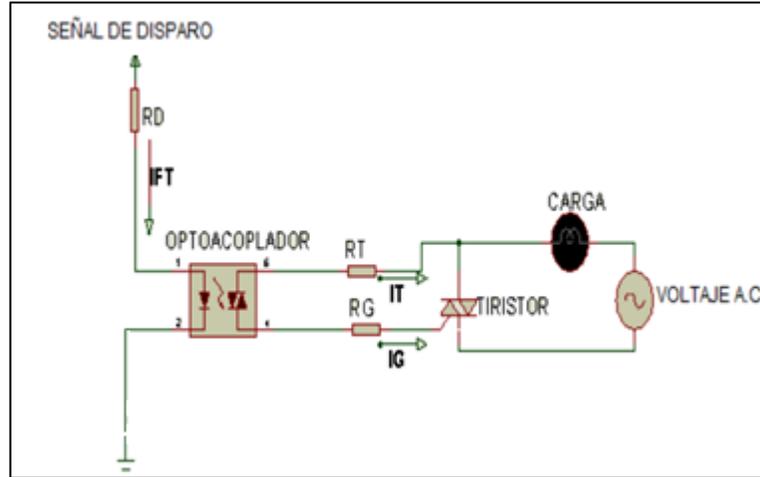


Figura 12 Etapa de potencia tiristor

Fuente: (Micolita, 2013)

A continuación se presentan los parámetros para cálculos de la etapa de potencia en circuitos con tiristor y MOC. La (Ec. 3. 4) representa el cálculo de la resistencia de disparo RD, dicha resistencia debe estar en la entrada del led de disparo del optoacoplador o MOC.

$$RD = \frac{Vcr}{IFT} \quad (\text{Ec. 3. 4})$$

La resistencia de puerta RG tiene la función de evitar el disparo del tiristor cuando el optoacoplador no conduce corriente y se calcula mediante la (Ec. 3. 5).

$$RG = \frac{VR - VG}{IG} \quad (\text{Ec. 3. 5})$$

La resistencia RT, se encarga de ser la limitante para dar un valor adecuado de IF cuando se dispara el tiristor y se calcula mediante la (Ec. 3. 6)

$$RT = \frac{VR}{IF} \quad (\text{Ec. 3. 6})$$

Para los cálculos de la etapa de acondicionamiento del actuador, se analizaron las características principales del MOC 3041 mostrado en la **Tabla 11**, dicho optoacoplador

es recomendado para aplicaciones de potencia como la que se realizó en este proyecto, adicionalmente en la **Tabla 12** se muestran las características de un tiristor triac BT136.

Tabla 11
Características principales del MOC 3041

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	RANGO	UNIDAD
VR	Voltaje de conducción	6	V
IF	Corriente de conducción	60	mA
IFT (Max)	Corriente máxima de conducción	1	A

Fuente: (Datasheet MOC 3041)

Tabla 12
Características Triac BT136

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	RANGO	UNIDAD
IG	Corriente disparo de puerta	50	mA
VG	Voltaje disparo de puerta	2	V

Fuente: (Datasheet TRIAC BT136)

Por la información señalada en la **Tabla 11** y la **Tabla 12**, y mediante las (Ec. 3. 4), (Ec. 3. 5) y (Ec. 3. 6) se obtuvieron los resultados de resistencias y estos se indican en la **Tabla 13**.

Tabla 13
**Resultados de los componentes
circuito de acondicionamiento
actuador**

SÍMBOLO	VALOR CALCULADO
RD	470 Ω
RG	1K Ω
RT	370 Ω
C	10 nF
R1	100 Ω

En la **Figura 13** se muestra un el circuito realizado como acondicionamiento del actuador y los valores de elementos calculados para la aplicación.

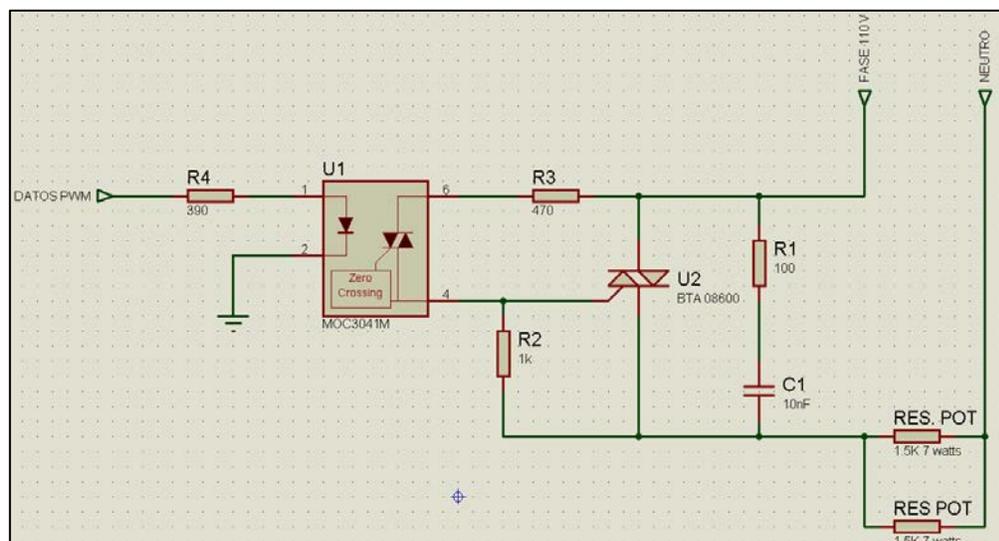


Figura 13 Circuito desarrollado Triac MOC

3.4.2 Selección del sensor

Para seleccionar el sensor se realizó un análisis de los requerimientos de nuestra aplicación mostrados en la **Tabla 9**. En la **Tabla 14** se muestran diversos tipos de sensores encontrados en el mercado con sus características principales.

Tabla 14
Selección de sensores de temperatura

SENSOR	Acondicionamiento de Señales Requerido	Exactitud	Sensibilidad	Comparación
Termopares	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificación • Filtrado • Compensación de unión fría 	Bueno	Bueno	<ul style="list-style-type: none"> • Auto-Energizado • Económico • Robusto • Rango de Alta Temperatura
RTD	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificación • Filtrado • Excitación de Corriente 	Excelente	Mejor	<ul style="list-style-type: none"> • Muy Exacto • Muy Estable
Termistor	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificación • Filtrado • Excitación de Voltaje 	Bueno	Excelente	<ul style="list-style-type: none"> • Alta Resistencia • Baja Masa Térmica
Fibra Óptica	<ul style="list-style-type: none"> • Muy Poca o Sin Amplificación • Filtrado 	Excelente	Excelente	<ul style="list-style-type: none"> • Ideal para Entornos Peligrosos • Ideal para Largas Distancias • Inmune al Ruido Inducido por Interferencia Electromagnética (EMI) • Pequeño, Ligero
DTH 100	<ul style="list-style-type: none"> • Acondicionamiento Incluido 	Bueno	Bueno	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño reducido • Estable • Económico

En la **Tabla 15** se indica una matriz de selección de sensor, con lo cual se puede tener una percepción clara de que sensor es el apropiado para la aplicación, la matriz de selección tomó en cuenta el criterio del diseñador.

Tabla 15
Matriz de selección de sensor de temperatura

	Termopar	RTD	Termistor	Fibra óptica	DTH100
Rango (T ambiente-50°)	5	5	5	5	5
Costo bajo (menos de \$10)	2.5	0	5	0	5
Tiempo de respuesta (1-2 s)	0	5	2.5	5	5
Tamaño reducido (12 x 15.5 x 5.5mm)	5	5	5	5	5
Precisión (± 2 °C)	5	5	2.5	5	5
Resolución (< 1 °C)	5	5	2.5	5	5
TOTAL	22.5	25	22.5	25	30

** Se utiliza 0 no conveniente, 2.5 conveniente, 5 muy conveniente

El sensor adecuado de acuerdo a la matriz de selección es el DTH100 por sus características positivas de un rango adecuado de medición, bajo costo, resolución, precisión y un tamaño reducido.

3.5 Dimensionamiento de conversor A/D para el sistema de control.

Como el objetivo es implementar el controlador por medio de una tarjeta de control se procede a dimensionar los conversores de señal, la resolución de la conversión está dada por la ecuación (*Ec. 3. 7*):

$$\Delta V_{\text{out}} = V_R * 2^{-n} \quad (\text{Ec. 3. 7})$$

ΔV_{out} = el mas pequeño cambio de voltaje

V_R = voltaje de referencia(votaje maximo)

n = numero de bits

Para la resistencia (actuador de calor) se necesita que el voltaje máximo de entrada sea 3 V, valor base impuesto para el diseño, entonces de acuerdo a la (*Ec. 3. 7*):

$$\Delta V_{\text{out}} = V_R * 2^{-n}$$

$$0.1 = 3V * 2^{-n}$$

$$0.033 = 2^{-n}$$

$$\ln 0.033 = -n \ln 2$$

$$n = 4.9 \quad (\text{Ec. 3. 7})$$

Entonces el conversor A/D de la tarjeta debe ser de 4 bits, ahora cabe recalcar que la resolución real sería de:

$$\Delta V_{\text{out}} = 3V * 2^{-4}$$

$$\Delta V_{\text{out}} = 0,18 V \approx 0.2 V$$

3.6 Dimensionamiento de conversor D/A

Para el conversor digital análogo fue necesario calcular el valor decimal requerido como se indica en la (Ec. 3. 8), para ello se impuso una salida de voltaje nominal análoga de 3V, por los resultados de la (Ec. 3. 7), la resolución del conversor análogo digital es 0,2V.

$$\text{Valor decimal} = \frac{V_{\text{analogico}}}{\text{resolución}} = \frac{3}{0.2} \quad (\text{Ec. 3. 8})$$

$$\text{valor decimal} = 15$$

Ahora para representar 255 en bits se tendría que:

$$2^n = 15$$

$$n \ln(2) = \ln(15)$$

$$\mathbf{n = 3.9 \text{ bits} \approx 4 \text{ bits}}$$

Entonces el conversor D/A de la tarjeta debe ser de 4 bits.

Por los resultados obtenidos en las ecuaciones (*Ec. 3. 7*) y (*Ec. 3. 8*) donde el conversor A/D debe tener una resolución de 5 bits y el conversor D/A una resolución de 4 bits, el microcontrolador de arduino UNO es el apropiado para la aplicación ya que la resolución de su conversor A/D y D/A es de 10 bits (Llamas, 2014).

3.7 Diseño del sistema de control de temperatura

Para comenzar con el diseño lo que se realizó fue hallar la función de transferencia de la planta, al ser este un modelo complejo se utilizó como ayuda la función Ident de Software de análisis matemático y para la obtención de datos se incluyó una entrada escalón (0-3) V, debido al voltaje que proporciona la tarjeta y se tomaron datos del sensor de temperatura. En la **Tabla 16** se muestran las 10 primeras lecturas de temperatura otorgada por el sensor y la entrada de voltaje, para el experimento se tomaron 760 lecturas y se consideró un tiempo de muestreo de 1 s.

Tabla 16
Primeros valores tomados en el experimento escalón de voltaje vs temperatura

MUESTRA	VOLTAJE (V)	TEMPERATURA(°C)
1	0	22
2	3	22
3	3	22
4	3	22
5	3	22
6	3	22
7	3	22
8	3	22
9	3	22
10	3	22

3.7.1 Modelamiento de la planta

Como se muestra en la **Figura 14** se procedió a colocar los datos de entrada y de salida en las matrices definidas para procesarlos en la herramienta ident de Software de análisis matemático.

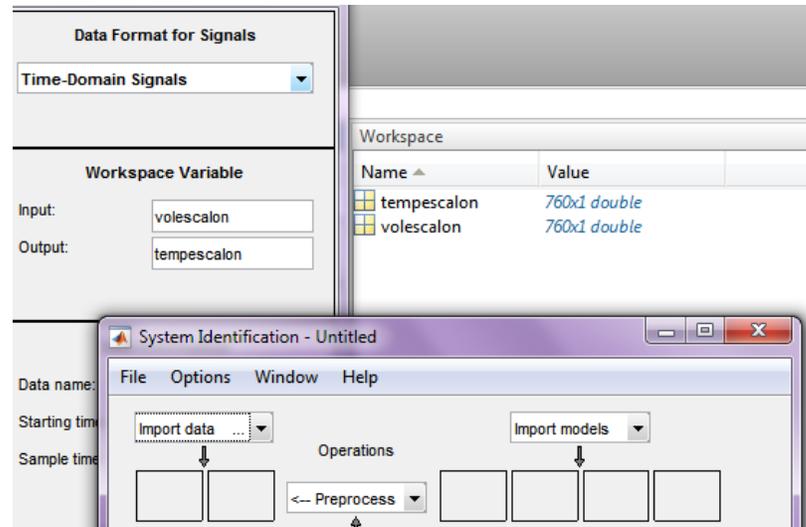


Figura 14 Datos importados en el comando ident para hallar la función de transferencia

Una vez ingresadas las matrices de valores de entrada y de salida del sistema se procedió a agregar el número de polos y ceros deseados para la estimación que realiza la aplicación para encontrar una función de transferencia que se ajusta a los datos obtenidos en la planta como se observa en la **Figura 15**.

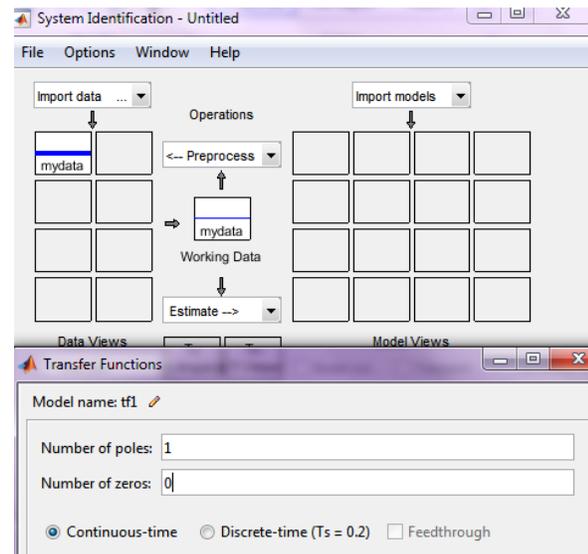


Figura 15 Polos y ceros para hallar la función de transferencia en ident

Finalmente se encontró la función de transferencia mediante el comando `ident` de Software de análisis matemático cuyo modelo grafico se muestra en la **Figura 16**.

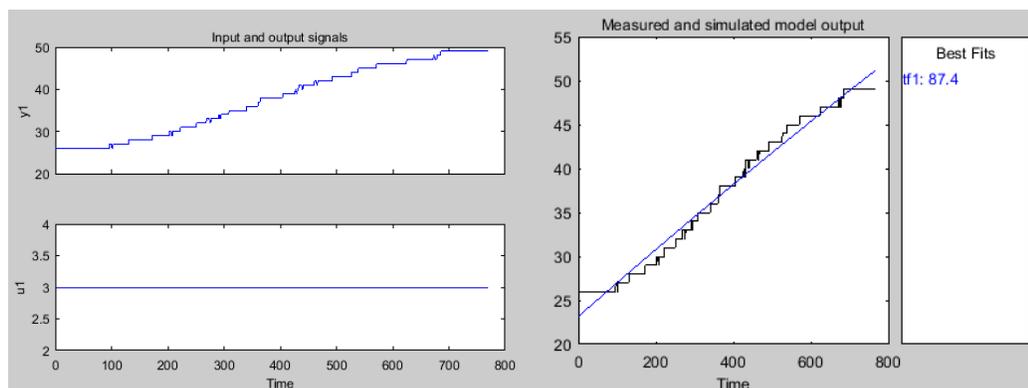


Figura 16 Función de transferencia planta Ident Software de análisis matemático

La función de transferencia obtenida (entrada escalón) se muestra mediante la **(Ec. 3. 9)**.

$$Gp(s) = \left(\frac{0.01408}{s + 0.0001523} \right) \quad \text{(Ec. 3. 9)}$$

3.7.2 Análisis de la respuesta del sistema

- **Sistema real**

En la **Figura 17** se muestra los datos tomados en la planta a una entrada escalón de 3 V, en ella se observó que el sistema alcanza 49 °C en 700 (s) o 12 minutos lo que indica que el sistema es lento, además el sistema no se estabilizó en un valor referencial por lo tanto se requirió un control que acelere el sistema y que lo mantenga referencia.

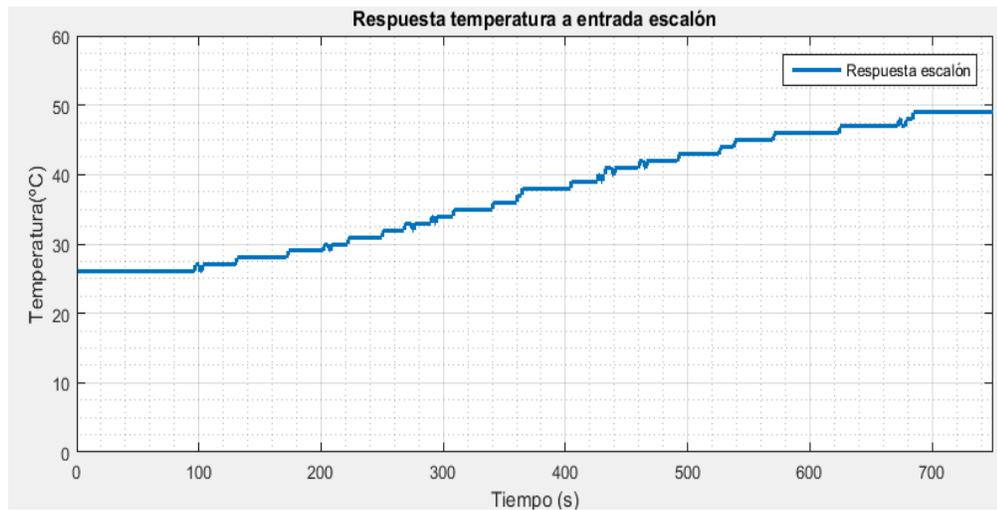


Figura 17 Respuesta real del sistema a una entrada escalón

- **Simulación**

En la **Figura 18** se presenta la respuesta de la planta sin controlador en lazo cerrado en simulación, en ella se observa que el tiempo de subida es mayor a 2 minutos y que no tiene sobreimpulso, el tiempo de estabilización es de aproximadamente 5 minutos, el sistema en simulación no presenta ruido.

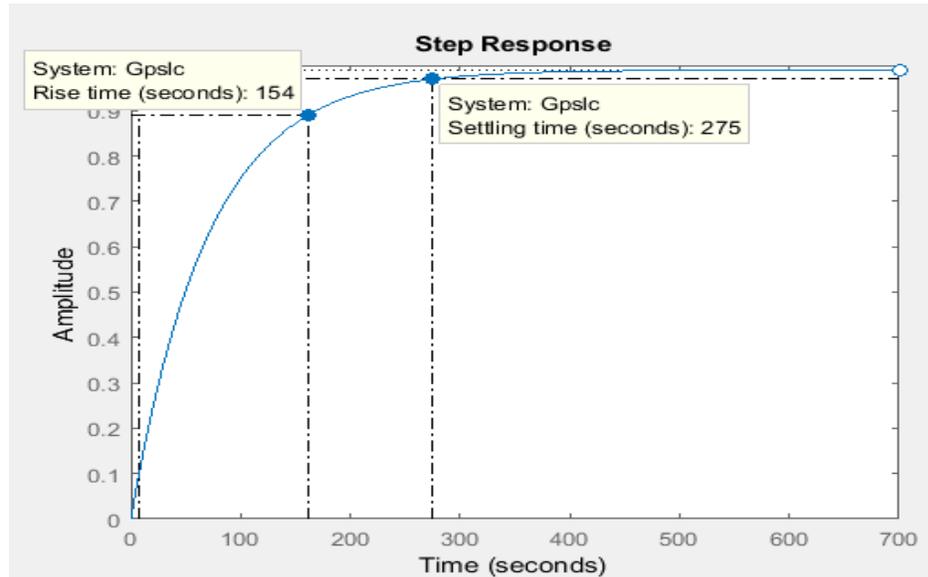


Figura 18 Respuesta en lazo cerrado de la planta

3.7.3 Cálculo periodo de muestreo

Una vez obtenida la función de transferencia de la planta se procedió a la discretización del sistema, previo a la discretización se halló el periodo de muestreo, en este caso se utilizó el método de Bandwidth que se calcula mediante la **(Ec. 3. 10)**.

$$\frac{W_s}{W_b} = 400 \quad \text{(Ec. 3. 10)}$$

Donde W_b es el ancho de banda de la función de transferencia en lazo cerrado obtenida en Software de análisis matemático, $W_b = 0.0142 \text{ rad/s}$, y W_s es el periodo de muestreo que se desea hallar.

$$W_s = 0.0142 * 400$$

$$W_s = 5.68 \text{ rad/s}$$

Mediante la **(Ec. 3. 11)** se realiza una transformación de radianes a segundos para obtener el periodo de muestreo.

$$T = \frac{2 * \pi}{W_s} \quad (\text{Ec. 3. 11})$$

$$T = \frac{2 * \pi}{5.68}$$

$$T = 1[s]$$

3.7.4 Discretización del sistema

El objetivo principal de discretizar la función de transferencia obtenida es procesar y controlar la señal mediante un medio digital, cuando se realiza un control digital la señal de entrada se convierte de discreta a continua y la señal de salida de continua a discreta. Este proceso se realiza mediante la colocación de un bloqueo en la entrada y una etapa de muestreo virtual a la salida.

Para discretizar el sistema se utilizó un comando que permite convertir modelos de la forma continua a forma discreta en Software de análisis matemático, obteniendo la (Ec. 3. 12):

$$Gp(z) = \frac{0.01408}{z - 1} \quad (\text{Ec. 3. 12})$$

3.7.5 Diseño del controlador

Para el inicio del diseño del controlador es importante analizar la respuesta de la planta en lazo cerrado sin controlador.

La (Ec. 3. 13) representa la función de transferencia de la planta en lazo cerrado con retroalimentación unitaria. La **Figura 19** muestra la respuesta de la función de transferencia de la planta en lazo cerrado, en ella se observan el tiempo de subida y el tiempo de estabilización de la planta.

$$Gpclc(s) = \frac{0.01408}{s + 0.0001523} \quad (\text{Ec. 3. 13})$$

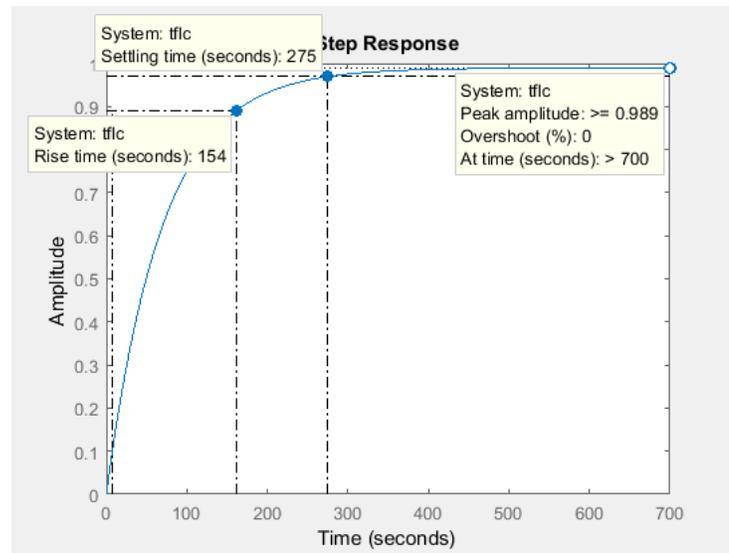


Figura 19 Respuesta del sistema en lazo cerrado sin controlador

En la **Figura 20** se observa el diagrama de bode de la función de transferencia de la planta en lazo cerrado, mediante esta grafica se permite la identificación de margen de fase y margen de ganancia, valores importantes para el diseño del controlador.

En la **Tabla 17** se presenta un resumen de los parámetros fundamentales de la planta sin controlador y en lazo cerrado.

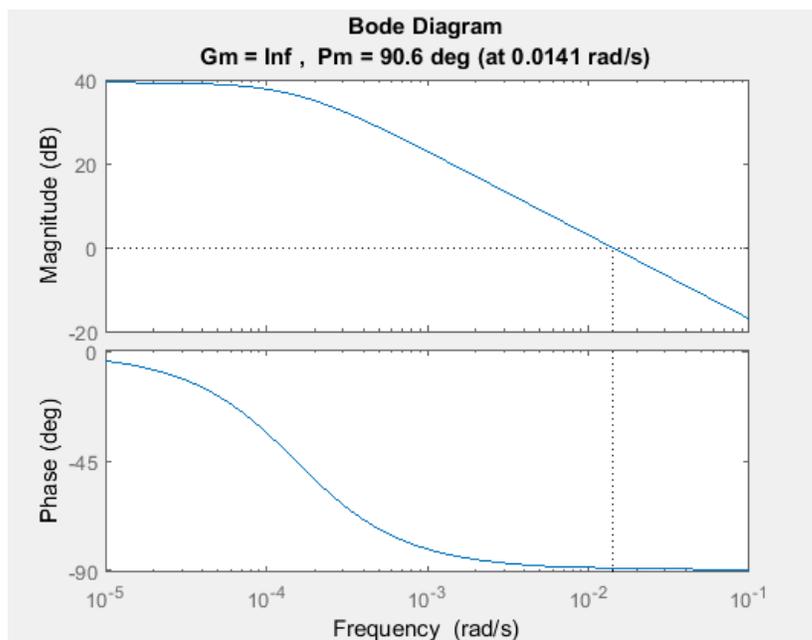


Figura 20 Diagrama de Bode función de transferencia en lazo cerrado

Tabla 17
Parámetros obtenidos en la respuesta en lazo cerrado del sistema sin controlador simulación

Parámetro	Sistema sin Compensar
MP	0
ts	275 s
tr	154 s
MG	Infinito
MF	90.6°
BW	0.3 dB
E_{ss}	0

3.7.6 Valores base de diseño para la aplicación

En la **Tabla 18** se muestran los valores que se han obtenido al analizar el sistema en lazo cerrado sin controlador, y además los valores deseados en el sistema para poder obtener los resultados de referencia de temperatura a los que debe estar expuesta la cámara para comenzar con las mediciones de los sensores.

Tabla 18
Valores ideales para el diseño del controlador de la planta

	Valor Obtenido	Valor deseado para el controlador	Justificación del valor deseado
Tiempo de estabilización	$t_s = 275 \text{ s}$	$t_s < 275 \text{ s}$	Se necesita un valor de tiempo de estabilización menor al actual, debido a que el controlador busca hacer el sistema más rápido.
Error en estado estacionario e_{ss}	$e_{ss} \approx 0\%$	$e_{ss} \approx 0\%$	El error en estado estacionario no debe sobrepasar un límite de 0%, debido a que el porcentaje de correlación entre el controlador y la respuesta que se espera debe ser muy similar para que el control sea ideal.

La **Tabla 19** muestra un resumen de las características que se ven afectadas en el sistema por cada acción de control, gracias a este resumen se concluyó que el controlador ideal es un PI (Proporcional-Integral) debido a que este hace que el tiempo de subida decrezca y que se elimine el error en estado estacionario que son los dos parámetros para el diseño del controlador.

Tabla 19
Resumen de características de Acciones de control

TIPO DE CONTROL	TIEMPO DE SUBIDA	SOBRE IMPULSO	TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN	ERROR EN ESTADO ESTABLE
P	Decrece	Crece	Cambo menor	Decrece
PI	Decrece	Crece	Crece	Se elimina
PD	Cambio menor	Decrece	Decrece	Cambio menor

Fuente: (Nuñez, 2007)

A continuación en la **Figura 21** se muestra una sintonización mediante el uso de PID tuner de Software de análisis matemático, donde se procedió a hallar los valores que se tomaron para la función que representa al controlador, PID tuner es una herramienta donde se introduce la función de transferencia de la planta y se colocan los parámetros deseados como tiempo de estabilización y robustez, este método utiliza algoritmos para escoger los valores de constantes K_p y K_i , se obtienen los valores ideales, de esta manera se facilita o confirma el trabajo del diseñador.

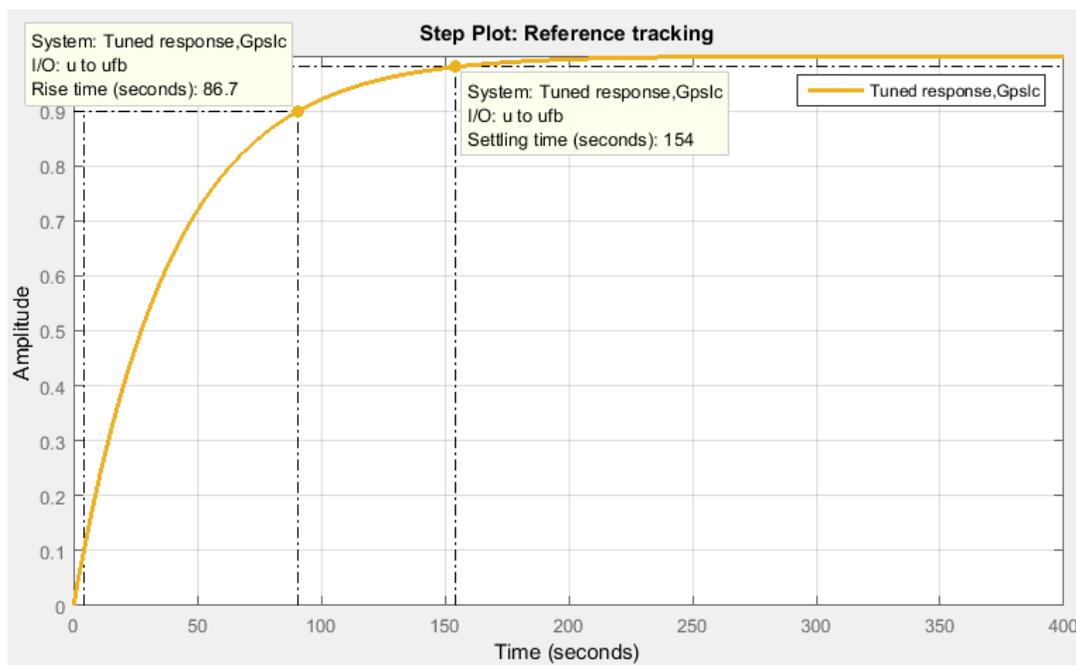


Figura 21 Modelo PI obtenido en la aplicación PID Tuner de Software de análisis matemático

La **Tabla 20** indica un resumen de las funciones de transferencia de la planta y del controlador con la finalidad de utilizar las ecuaciones para proseguir con el diseño del controlador.

Tabla 20
Funciones de transferencia de la planta y el controlador

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	
PLANTA	$G_p(s) = \left(\frac{0.01408}{s + 0.0001523} \right) \quad (\text{Ec. 3. 9})$
CONTROLADOR	$G_c(s) = \left(\frac{1.8s + 0.0256}{s} \right) \quad (\text{Ec. 3. 14})$

Para poder observar cual es el resultado del diseño del controlador de la planta es necesario observar la respuesta del sistema con controlador en lazo cerrado para ello se deben realizar varias operaciones, las cuales se indican a continuación:

- La multiplicación de la función de transferencia con el controlador se muestra en la **(Ec. 3. 15)** y se realiza con la finalidad de obtener la repuesta final de la planta con controlador.

$$G_{pc}(s) = G_p(s) * G_c(s) = \frac{0.02535 + 0.0003608}{s^2 + 0.0001523 s} \quad \text{(Ec. 3. 15)}$$

- Realizar una retroalimentación unitaria, el resultado se presenta en la **(Ec. 3. 16)**.

$$G_{pcl}(s) = \frac{0.02535 s + 0.0003608}{s^2 + 0.0255 s + 0.0003608} \quad \text{(Ec. 3. 16)}$$

En la **Figura 22** se muestra la respuesta del sistema controlado en lazo cerrado, y sus principales características, en esta imagen se observa que al realizar un lazo cerrado se

crea un sobrepico que alcanza un 21.8% esto es debido a que al acelerar el tiempo de respuesta de la planta la parte proporcional del controlador eleva el sobreimpulso.

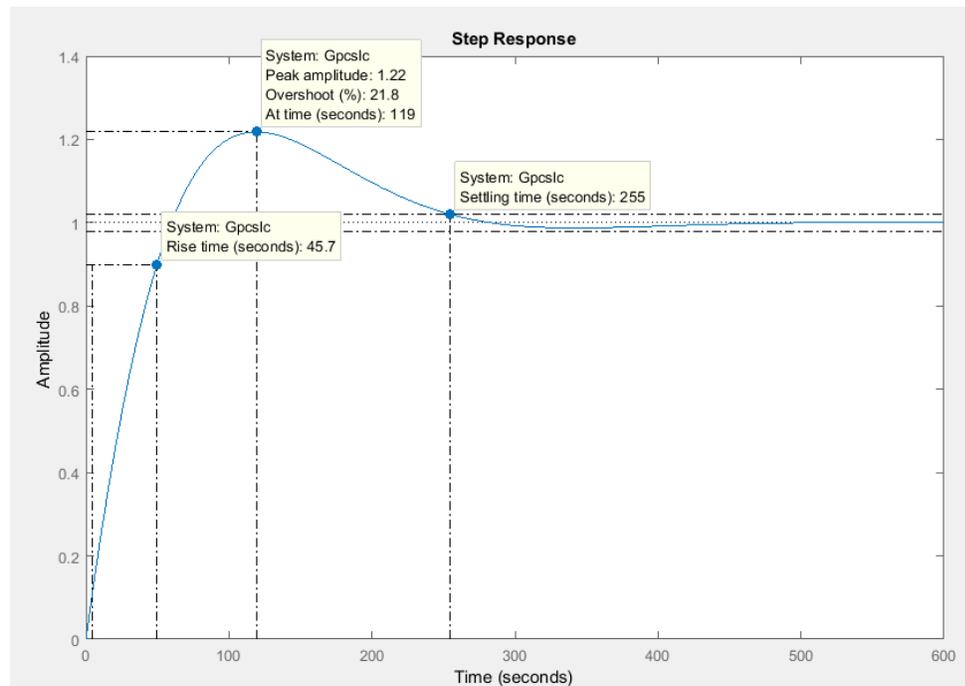


Figura 22 Respuesta en lazo cerrado del sistema controlado

En la **Figura 23** se muestra el diagrama de bode del sistema controlado donde se observa el margen de fase y el margen de ganancia. Con las dos graficas se realiza el análisis respectivo para comprender si el controlador cumple con los parámetros de diseño, el resumen de los parámetros del sistema con el controlador se muestran en la **Tabla 21**.

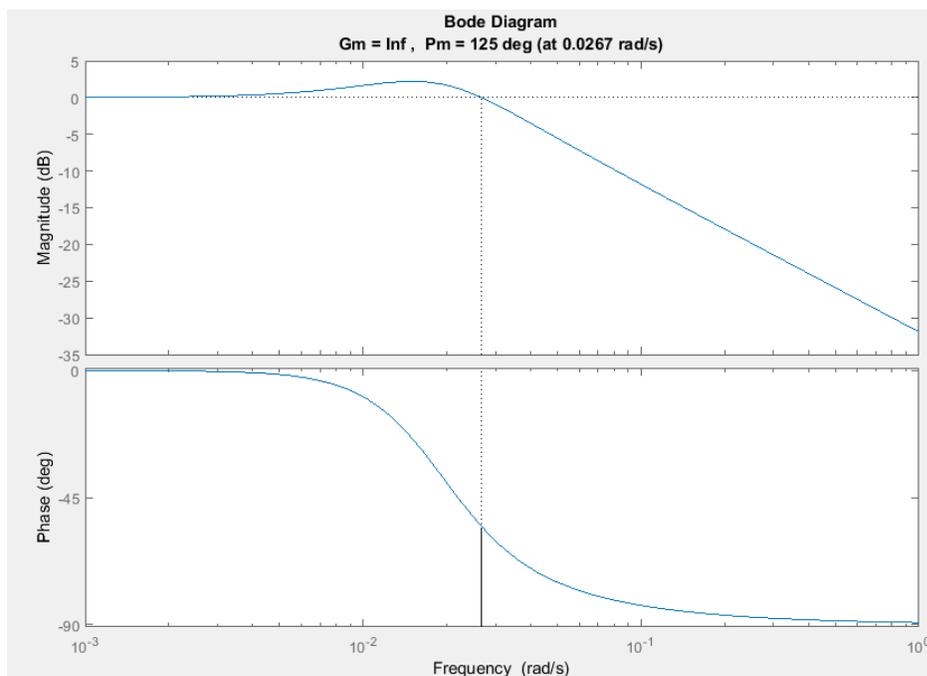


Figura 23 Diagrama de bode del sistema controlado

Los resultados de parámetros mostrados en la **Tabla 21** permiten notar que el objetivo del controlador se cumplió, manteniendo el error en estado estacionario en cero y reduciendo considerablemente el tiempo de subida.

Tabla 21
Parámetros importantes de la respuesta del sistema controlado

Parámetro	Sistema controlado
MP	21.8%
ts	45.7 s
tr	255 s
MG	Infinito
MF	125°
BW	0.0267
E_{ss}	0

La **Figura 24** muestra una comparación gráfica de las respuestas de los sistemas en lazo cerrado con controlador y sin controlador, se puede observar que el tiempo de subida del sistema con controlador es mucho menor que el sistema sin controlador.

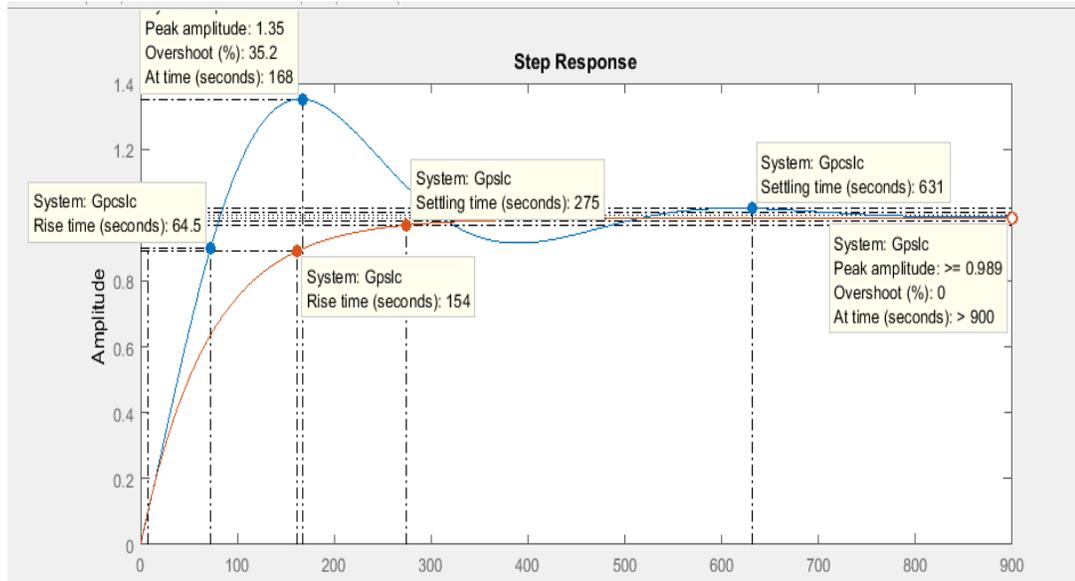


Figura 24 Comparación de la respuesta del sistema en lazo cerrado controlado y sin controlado

En la (Ec. 3. 17) se muestra la función de transferencia del controlador en tiempo discreto, este proceso se realizó con la finalidad de determinar la programación que se debe colocar en la tarjeta de control.

$$G_c(s) = \left(\frac{1.8s + 0.0256}{s} \right) \quad (\text{Ec. 3. 14})$$

$$G_c(z) = \frac{1.8z - 1.774}{z - 1} \quad (\text{Ec. 3. 17})$$

Se realizó una ecuación diferencia, la cual se detalla en la (Ec. 3. 18) con la finalidad de programar el sistema de control en función del error que se puede propagar e introducirlo en el microcontrolador.

$$Gc(z) = \frac{1.8z - 1.774}{z - 1} \quad (\text{Ec. 3. 17})$$

$$\frac{M(z)}{E(z)} = 0.885 * \frac{z}{z - 1} - 0.8683 * \frac{1}{z - 1} \quad (\text{Ec. 3. 18})$$

Para poder efectuar la transformada z, que es un proceso parte de convertir la función del controlador en muestras, se realizó un artificio matemático que no afectó la expresión, como se muestra en la (Ec. 3. 19), de esta manera se obtuvieron términos de fácil resolución por medio de propiedades.

$$\frac{M(z)}{E(z)} = 0.885 * \frac{z}{z - 1} - 0.8683 * \frac{z^{-1} * z}{z - 1} \quad (\text{Ec. 3. 19})$$

La aplicación de la transformada inversa de z a la expresión anterior se detalla en la (Ec. 3. 20) para poder obtener el controlador en muestras.

$$Z^{-1}\{M(z)\} = Z^{-1}\left\{E(z) * 0.885 * \frac{z}{z - 1} - E(z) * 0.8683 * \frac{z^{-1} * z}{z - 1}\right\} \quad (\text{Ec. 3. 20})$$

$$m(k) = 0.885(1^k)e(k) - 0.8683(1^{k-1})e(k)$$

3.8 Resultados

Para analizar el funcionamiento del controlador en el prototipo real, se realizó un experimento de respiración del dispositivo e implementada la etapa de control de temperatura de la cámara, en este experimento se tomaron en cuenta los parámetros mostrados en la **Tabla 22**.

Tabla 22
Parámetros para experimentación

Parámetro	Valor
Temperatura de referencia	29 (° C)
Tiempo de experimentación	1200 (s)
Temperatura ambiente	24 (° C)
Réplicas tomadas de respiración	10
Sensor de temperatura	DTH100
Periodo de muestreo	1 (s)

En la **Figura 25** se muestra el funcionamiento real del controlador de temperatura implementado para la cámara de sensores, la gráfica azul representa los valores de temperatura en cada instante de tiempo, mientras que la gráfica roja muestra el valor de referencia de 29° con el que se realizó el experimento.

El comportamiento de la salida del sistema con controlador fue estable a los 600 (s) y el tiempo de subida del sistema fue 200 (s), el controlador implementado si aceleró el sistema para mantener una temperatura de referencia, sin embargo no lo hizo como se mostró teóricamente, esto se debe principalmente a las perturbaciones externas como el cambio de fluido constante en el interior de la cámara y la limpieza automática de la nariz electrónica.

El error en estado estacionario es aproximado a 0, aunque en instantes toma valores de +- 1° C, esto debido principalmente a perturbaciones externas y a la configuración física de la cámara de sensores. El sistema de control si funcionó y cumplió su objetivo principal de mantener la cámara de sensores a una temperatura de referencia para mejorar la lectura de los sensores de gas que conforman la nariz electrónica.

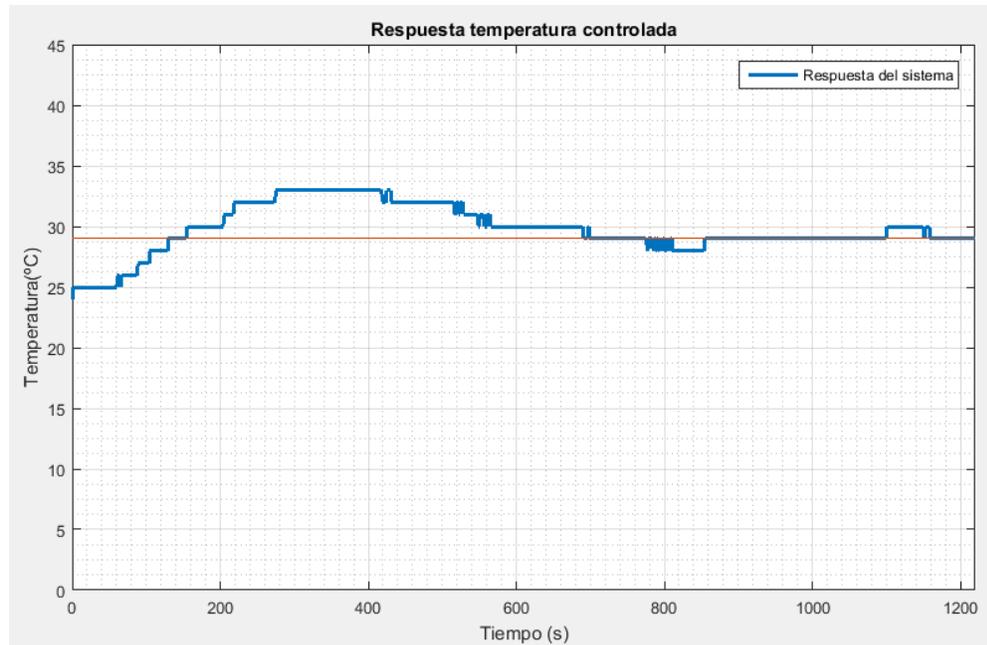


Figura 25 Respuesta control de temperatura

Con la respuesta obtenida se procede a calcular los valores de sobrepico, tiempo de estabilización, tiempo de subida y error en estado estacionario con los datos reales del sistema:

- M_p (Sobrepico)

$$M_p\% = \frac{c(tp) - c(\infty)}{c(\infty)} * 100\% \quad (\text{Ec. 3. 21})$$

En la (Ec. 3. 21) tp : es el valor de tiempo donde la respuesta alcanza el primer pico del sobrepaso, $c(tp)$ es el valor de temperatura en el sobreimpulso y $c(\infty)$ es el valor de temperatura en el estado estacionario.

$$M_p\% = \frac{34 - 29}{29} * 100\%$$

$$M_p\% = 17.24\%$$

- t_s : Tiempo de estabilización

$$t_s = 830 \text{ (s)}$$

- t_r : Tiempo de subida

$$t_r = 190 \text{ (s)}$$

- E_{ss} : Error en estado estacionario

$$E_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{R(s)}{1 + Gp(s)}$$

$$E_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{1}{s} * \frac{1}{1 + \frac{0.01408}{s + 0.0001523}}$$

$$E_{ss} \approx 0$$

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA CONVECTIVA DE MASA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DOPAJE AUTOMÁTICO.

En este capítulo se realizó un estudio para el diseño de un sistema automático de dopaje para proveer una solución a la aplicación manual del dopante a la muestra a analizar. Se optimizó así el tiempo de análisis y se evitó pérdida de información.

4.1 Metodología Experimental

Para la excitación adecuada de los sensores, es necesario obtener los volátiles de la muestra a analizar, esto se logra al alternar la muestra a través de la combinación con una sustancia dopante (Merino, 2013). Cada experimento necesita de una cantidad de dopante para generar datos reales y que brinden información útil; en esta parte del proyecto se realizaron experimentos para detección de muestras explosivas sin dopante (muestra testigo) con la finalidad de demostrar que los sensores no reaccionan a dicha muestra sin que se agregue una sustancia adicional, y que al no generarse volátiles de la muestra, lo que ingresa a la cámara de sensores es únicamente aire.

El análisis de transferencia convectiva de masa se realizó con el fin de determinar el tiempo final de consumo de dopante, para ello primero se obtuvo el número de moles de alcohol, con la que ha sido dopada la muestra durante la ejecución del experimento. Esto permitió obtener un valor para que el sistema de dopaje automático suministre la cantidad adecuada de dopante cada cierto tiempo y al inicio de cada prueba.

A continuación se detallan los términos utilizados en esta fase experimental:

- Transferencia convectiva de masa: Es el mecanismo mediante el cual un fluido se difunde en otro en virtud de su coeficiente de concentración y su coeficiente de difusión. (çengel & Cimbala, 2006)

- Flujo volumétrico (Q): Es el volumen de fluido por unidad de tiempo que circula en el sistema y para la realización de los diferentes experimentos se tomará un valor base. (Welty, 1994)
- Diámetro (Φ): Es el diámetro del contenedor donde se deposita el dopante, el contenedor se utilizó debido a la facilidad de medición de líquidos en el mismo ya que cuenta con una regleta de medida y además es de un tamaño aceptable para la aplicación.
- Velocidad del fluido en el contenedor (v): Es la relación entre el *flujo* volumétrico y el área del contenedor del dopante.
- Volumen de dopante (V): Es la cantidad de dopante con la que se realizaron los experimentos, este valor viene dado por las dimensiones de los contenedores del dopante y una es un valor base para la experimentación.
- Sustancia de dopaje: Es la sustancia que genera los volátiles de la muestra explosiva, en este caso se trabajó con alcohol comercial que está conformado por: 70% de etanol y 30% de agua.
- Coeficiente de difusión de la mezcla en el aire (D_{AB}): Es la velocidad a la que con la que se difunde un producto de la mezcla en el aire, este valor viene tabulado para gases y elementos comunes.
- Presión de vapor de la mezcla (P_vT): Es la presión que ejerce un líquido cuando cambia de fase líquida a gaseosa, y para la mezcla se calcula con los valores de presión de vapor de los componentes de la mezcla y su porcentaje en la misma.
- Moles totales de la mezcla: Se calcula con el número de moles de los componentes de la mezcla y su porcentaje en la misma, para ello es importante la información de la densidad y la fracción molar de cada componente, los valores utilizados para estos cálculos fueron tomados de: (Camacho & Martinez, 2002), los valores obtenidos de moles se calcularon con un valor base de volumen de 2 cm^3 o 2 ml.
- Concentración de la mezcla en la superficie $C_{A,s}$: Es la cantidad de alcohol etílico en el vapor inmediatamente encima de la superficie del líquido. La concentración en la mezcla alcohol agua, depende de la constante universal de los gases ideales (R) y la temperatura en grados kelvin (t). (Welty, 1994)

- Número de Reynolds (Re_L): El número de Reynolds se puede definir como la relación entre la fuerza debida por la inercia y la fuerza viscosa. (Welty, 1994).
- Número de Schmidt (Sc): Es razón de la viscosidad cinemática y la difusividad de la mezcla en el aire. (Welty, 1994)
- Coeficiente transferencia de masa (Kc): Es el coeficiente de transferencia convectiva de masa de la mezcla, en función del número de Reynolds, el número de Schmidt, difusividad de mezcla en el aire y la longitud de mezcla. (Welty, 1994)

4.2 Ecuaciones y ejemplos de cálculos

Para el análisis de la cantidad de fluido que se transporta por unidad de tiempo en el sistema, fue necesario hallar varios parámetros importantes que describen la transferencia convectiva de masa, para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones y se realizaron sus ejemplos de cálculo:

- Velocidad del fluido en el contenedor (v):

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{(Ec. 4. 1)}$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1.833 \times 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{1.539 \times 10^{-4} [m^2]}$$

$$v = 0.1189 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- Coeficiente de difusión de la mezcla en el aire D_{AB} :

$$D_{AB}T = X_1 * D_{Ab}etanol + (1 - X_1) * D_{AB}agua \quad \text{(Ec. 4. 2)}$$

$$D_{AB}T = 0.7 * 1.22 * 10^{-5} + 0.3 * 2.6 * 10^{-5}$$

$$D_{AB}T = 1.63 * 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

- Presión de vapor de la mezcla $P_V T$:

$$P_V T = X_1 * P_{V \text{ etanol}} + (1 - X_1) * P_{V \text{ agua}} \quad \text{(Ec. 4. 3)}$$

$$P_V T = 0.7 * 5950 + 0.3 * 2630$$

$$P_V T = 4954 [Pa]$$

- Moles totales de la mezcla, para la (Ec. 4. 4) se tomó en cuenta la **Tabla 24**.

$$\#moles T = X_1 * \#moles \text{ etanol} + (1 - X_1) * \#moles H_2O \quad \text{(Ec. 4. 4)}$$

$$\#moles T = 0.7 * 0.0343 + 0.3 * 0.111$$

$$\#moles T = 0.057 \text{ moles}$$

- Concentración de la mezcla en la superficie $C_{A,S}$:

$$C_{A,S} = \frac{P_V * T}{R * T} \quad \text{(Ec. 4. 5)}$$

$$C_{A,S} = \frac{4954 [Pa]}{8.314 \left[\frac{Pa * m^3}{mol * ^\circ K} \right] * 289^\circ K}$$

$$C_{A,S} = 2.06 \left[\frac{moles}{m^3} \right]$$

- Número de Reynolds

$$Re_L = \frac{\text{fuerza debida a la inercia}}{\text{fuerza viscosa}} = \frac{v \cdot L}{\mu} \quad (\text{Ec. 4. 6})$$

- L : Longitud de la masa del fluido
- v : velocidad del fluido en el contenedor
- μ : viscosidad cinemática

$$Re_L = \frac{0.1189[m/s] * 0.014[m]}{1.51 * 10^{-5}[m^2/s]}$$

$$Re_L = 110.23$$

- Número de Schmidt (Sc):

$$Sc = \frac{\mu}{D_{AB}} \quad (\text{Ec. 4. 7})$$

- μ : viscosidad cinemática
- D_{AB} : Difusividad de la mezcla en el aire

$$Sc = \frac{1.51 * 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]}{1.63 * 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]}$$

$$Sc = 0.926$$

- Coeficiente transferencia de masa (K_c)

$$k_c = \frac{0.664 * D_{AB} * Re_L^{\frac{1}{2}} * Sc^{\frac{1}{3}}}{L} \quad (\text{Ec. 4. 8})$$

- Re_L = Número de Reynolds
- Sc = Número de Schmidt

- $L = \text{Longitud de la masa del fluido}$

$$k_c = \frac{0.664 * 1.5393 * 10^{-4} [m^2/s] * 110.23^{\frac{1}{2}} * 0.92^{\frac{1}{3}}}{0.014 [m]}$$

$$k_c = 7.894 * 10^{-3} [m/s]$$

- Velocidad de transferencia convectiva de masa:

$$W_A = K_c * A * C_{A,S} \quad (\text{Ec. 4. 9})$$

- W_A corresponde a la transferencia de masa molar de la especie A.
- K_c es el coeficiente de transferencia convectiva de masa.
- $C_{A,S}$ Es la concentración de la especie A encima de la superficie del líquido.

$$W_A = 7.894 * 10^{-3} \left[\frac{m}{s} \right] * 1.5393 * 10^{-4} [m^2] * 2.06 \left[\frac{\text{moles}}{m^3} \right]$$

$$W_A = 2.503 * 10^{-6} \left[\frac{\text{moles}}{s} \right]$$

Ecuaciones tomadas de: (Welty, 1994)

El cálculo indica que se están transfiriendo 2.503×10^{-6} moles de alcohol comercial por cada segundo en el sistema analizado, desde el contenedor de alcohol hasta la cámara de la sustancia explosiva a analizar.

Los valores del dopante etanol-agua se presentan a continuación en la **Tabla 23** y **Tabla 24**. Además los valores propuestos para el experimento que corresponden a las características del compresor, fluido base, y contenedor se encuentra en la **Tabla 25**.

Tabla 23
Parámetros de los componentes del dopante

Sustancia	Concentración	Presión de vapor [Pa]	Densidad [Kg/m ³]	Difusividad en el aire [m ² /s]
ETANOL	70%	5950	787	1.22 x 10 ⁻⁵
AGUA	30%	2630	1000	2.6 x 10 ⁻⁵

Fuente: (Camacho & Martinez, 2002)

Tabla 24
Determinación de moles totales de la mezcla alcohol comercial

Componente	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Fracción molar [g/mol]	Moles
Etanol 70%	1.4	0,789	46	0.021
Agua 30%	0.6	1	18	0.0333

Tabla 25
Bases y parámetros utilizados para experimentación del dispositivo

Denominación	Símbolo	Valor
Flujo volumétrico	Q	$1.1 \left[\frac{l}{min} \right] = 1.833 \times 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]$
Diámetro	ϕ	0.014 [m]
Área	A	$1.539 \times 10^{-4} [m^2]$
Velocidad	v	0.1189 $\left[\frac{m}{s} \right]$
Volumen	V	2 [ml]
Viscosidad cinemática	μ	$1.51 \times 10^{-5} [m^2 / s]$
Moles totales 2 ml alcohol comercial	#molesT	0.57 moles

4.3 Tiempo de transferencia convectiva de masa

Es el tiempo necesario para que una cantidad determinada de dopante (alcohol comercial) se difunda en el flujo de aire, y se calcula de la siguiente manera:

$$t = \frac{\#molesT}{W_A} \quad (\text{Ec. 4. 10})$$

$$t = \frac{0.057 \text{ moles}}{2.503 * 10^{-6} \left[\frac{\text{moles}}{\text{s}} \right]}$$

$$t = 22772.67 \text{ s} \approx 6 \text{ h } 19 \text{ min}$$

El tiempo requerido para transferir 2 ml de dopante (alcohol comercial) hacia la sustancia explosiva a analizar, antes de que se disuelva por completo es de 6h 19 min, concluyendo que los experimentos no podrán exceder este límite de tiempo sin antes haber recargado el depósito de alcohol a través de un sistema automático de dopaje.

4.4 Implementación de sistema automático de inyección de dopante a la muestra

A continuación en la **Figura 26** se muestra un diagrama de flujo del sistema de dopaje automático del sistema, en este programa se activa la bomba que inyectará alcohol al depósito de dopante por un tiempo de 45 (ms) que es el tiempo en el cual el depósito se llena con 2ml de alcohol.

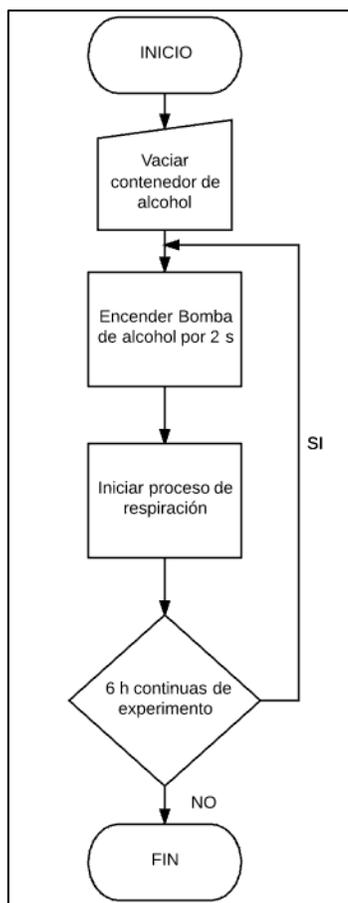


Figura 26 Diagrama de flujo proceso de dopaje automático

En la **Figura 27** se observa el diagrama neumático del sistema de inyección del dopante, este sistema entra en funcionamiento de dos maneras una de forma manual a través de un comando en el teclado de control, y otra con funcionamiento automático dependiendo del tiempo de experimentación que se haya realizado. Por ejemplo si se han experimentado 6 horas continuas, el sistema aporta automáticamente 2 ml de alcohol al contenedor del dopante transcurrido este tiempo.

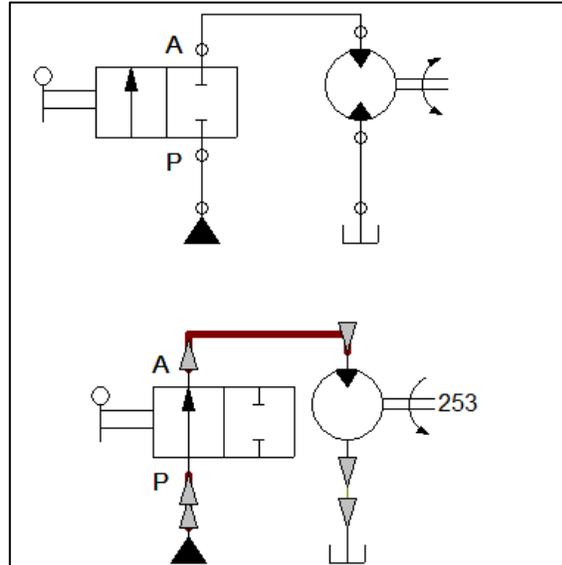


Figura 27 Diagrama de sistema de inyección del dopante

4.5 Experimentación

Para la experimentación se colocó en un contenedor 2 ml de alcohol y el equipo en modo de inyección de sustancias, como se observa en la **Figura 28**. Se tomó una lectura inicial y una después de 30 minutos; esto con la finalidad de realizar una relación de en cuanto tiempo se agotarán los 2 ml de alcohol. Con los 2 ml de alcohol en 6h y 19min debería terminarse toda la cantidad de alcohol del contenedor. Además para la experimentación se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

1. Franja horaria del día: desde las 08:00 hasta las 11:30 am.
2. Lugar de experimentación: Laboratorio de Electrónica 4 x 6 m² Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
3. Cantidad de sustancia: 2ml de alcohol comercial
4. Tiempo de experimentación: Treinta minutos (30 min.), con absorción constante.

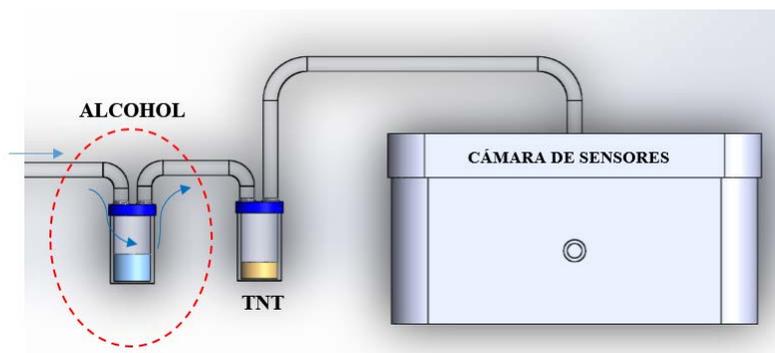


Figura 28 Esquema de dopaje automático diseñado para experimentación

4.6 Resultados

En el análisis del contenedor de dopante, los resultados muestran un crecimiento del consumo de alcohol respecto al tiempo como se muestra en la **Figura 29**, que es un comportamiento esperado según la bibliografía, sin embargo para poder comprobar la veracidad de los cálculos se realizó una comparación entre los resultados obtenidos y los valores reales, además de una regresión lineal donde se analizó la curva obtenida.

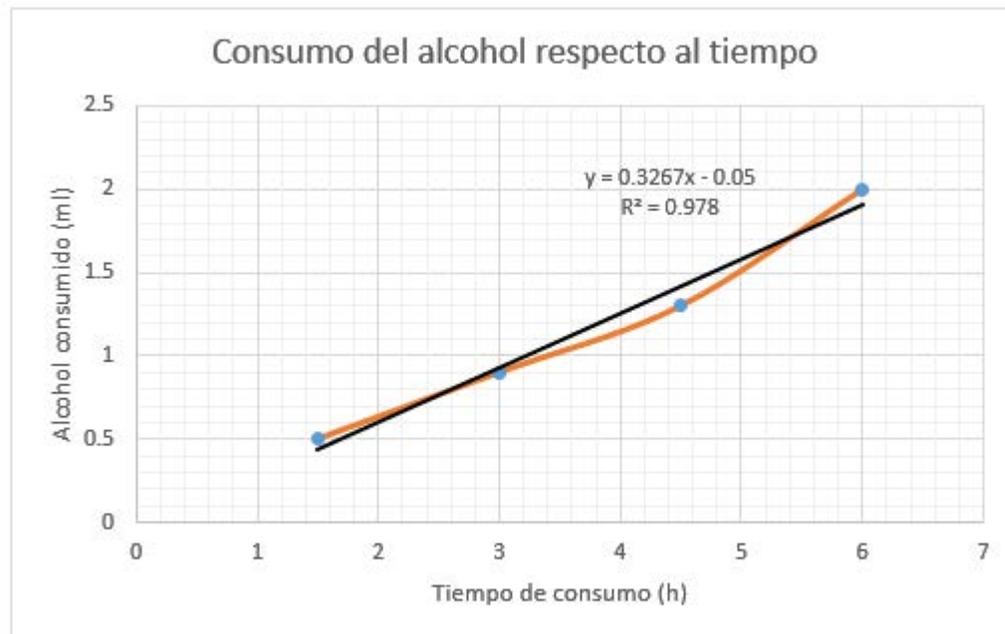


Figura 29 Resultados experimentación dopaje automático con tendencia lineal

Para analizar el experimento de dopaje de la **Figura 29** se colocó una línea de tendencia con una ecuación lineal, la misma que proporcionó un coeficiente de determinación (R^2), al tener un valor de $R^2 = 0.978$ y una ecuación del tipo $y = a x + b$, donde b tiende a 0, se puede considerar que el modelo lineal es válido para este estudio.

Tabla 26
Resultados
experimentación dopaje
automático

Tiempo (h)	Alcohol (ml)
1.5	0.5
3	0.9
4.5	1.3
6	2

Para el análisis de resultados se utilizó la teoría del error porcentual, la misma utilizó el resumen mostrado en la **Tabla 27**

Tabla 27
Datos calculados y obtenidos para tiempo de consumo del dopante

TIEMPO CALCULADO	TIEMPO REAL	Alcohol consumido
6h 19 minutos	6h	2 ml
379 minutos	360 minutos	2 ml

$$e\% = \frac{379 - 360}{360} * 100\%$$

$$e\% = 5.3\%$$

El error obtenido entre el tiempo de consumo de 2ml de alcohol calculado y real observados en la **Tabla 27** es de 5.3%, por lo cual el tiempo de inyección deberá realizarse cada 6h, y además se demuestra que el dopante está siendo transportado todo el tiempo por el sistema apoyando la teoría de que se puede poner el mismo por separado sin afectar la muestra a analizar.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE MECÁNICA DE FLUIDOS PARA UN PROCESO DE RESPIRACIÓN DEL DISPOSITIVO NARIZ ELECTRÓNICA

En esta parte del proyecto se optimizó el dispositivo mediante el estudio de mecánica de fluidos para garantizar una respiración correcta y eficiente, también se incluyó el análisis de una secuencia de respiración basada en un método experimental, donde se tomó en cuenta el tiempo que tomaban los sensores en excitarse ante una muestra y el tiempo que tomaba el sistema en ser limpiado para poder recibir muestras nuevas. El funcionamiento neumático del dispositivo tiene el objetivo de imitar el sistema respiratorio humano.

5.1 Diseño del sistema neumático del proceso de respiración del dispositivo

La disposición de los elementos neumáticos se establece según la necesidad de optimizar el diseño para el proceso de respiración del dispositivo, en esta parte del proyecto se identifican los componentes del sistema artificial de respiración de la nariz electrónica y además se establece el tiempo de aspiración y limpieza que debe tener el dispositivo para su correcto funcionamiento.

En la **Figura 30** se muestra el diseño propuesto, este diseño se determinó después de varios experimentos que verificaron que el proceso de dopaje automático fue eficiente en el **Capítulo IV**, en este diseño se colocaron 3 electroválvulas para mejorar el tiempo de limpieza respecto al prototipo anterior. Además se determinó el tiempo de respiración óptimo (aspiración y limpieza de muestra).

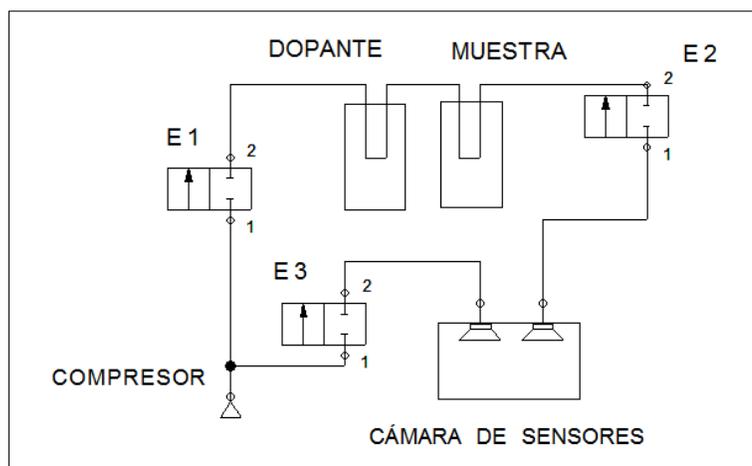


Figura 30 Diseño esquema neumático de respiración

La disposición neumática está conformado por los siguientes componentes:

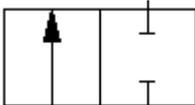
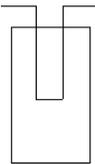
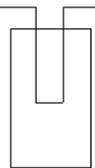
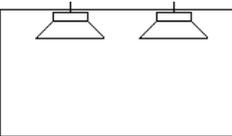
- 3 electroválvulas
- 1 compresor de aire
- 2 Contenedores, uno de muestra y otro de dopante
- Tubería de 4 mm de diámetro interior

La parte neumática en el dispositivo está enfocada directamente en la respiración, por este motivo, para que el proceso sea real se realizó una secuencia automática, cuyas partes se muestra a continuación en la **Tabla 28**.

Para la determinación de tiempos para el proceso de respiración se realizó un experimento con los sensores y se determinó el tiempo en que las mediciones llegan a estabilizarse, así mismo el tiempo en que los sensores llegan a su estado inicial una vez que ya no se inyecta muestra a la cámara de sensores.

Se aumentó una electroválvula más al diseño realizado anteriormente con la finalidad de favorecer el proceso de limpieza y evitar la contaminación permanente del sistema posterior a la absorción de muestras para análisis.

Tabla 28
Tabla de elementos del sistema neumático de respiración

ELEMENTO	SÍMBOLO	IMAGEN REAL
<p>E1, E2, E3 (Electroválvulas)</p>		
<p>DOPANTE (Contenedor de alcohol)</p>		
<p>MUESTRA (Contenedor de TNT)</p>		
<p>CÁMARA DE SENSORES</p>		
<p>COMPRESOR</p>		

Para la respiración del dispositivo se deben analizar 2 subprocesos, el de aspiración o absorción y el de limpieza del sistema.

a) Proceso de aspiración o absorción:

En el diagrama de flujo de la **Figura 31** se explica el funcionamiento del proceso, este comienza cuando el botón inicio está activado, se procede a activar la válvula E1 y E2 y encender el compresor que proporciona de aire al sistema, este proceso de aspiración se mantiene durante 60 segundos y finaliza para proseguir con el siguiente proceso.

La configuración de los elementos neumáticos del proceso de aspiración se muestra en la **Figura 32**, además la función y el estado inicial de cada elemento se describen en la **Tabla 29**.

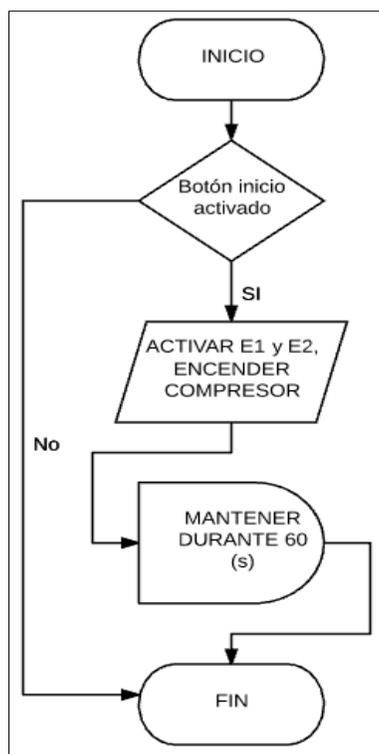


Figura 31 Diagrama de flujo subproceso de aspiración

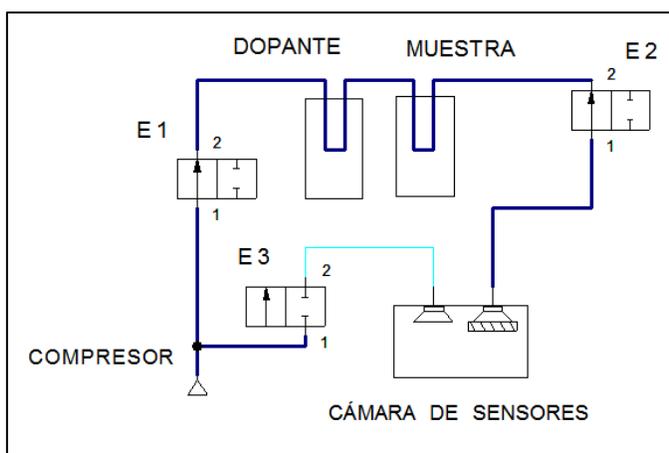


Figura 32 Esquema subproceso de aspiración del dispositivo

Tabla 29
Elementos proceso de Aspiración

PROCESO DE ASPIRACIÓN			
ELEMENTO	DEN.	ESTADO AL INICIAR	FUNCIÓN
Electroválvula 1	E1	Activada	Permite el paso del aire del compresor hacia los contenedores de dopante y muestra.
Electroválvula 2	E2	Activada	Permite el paso del aire contaminado a la cámara de sensores
Electroválvula 3	E3	Desactivada	Permite el paso de aire limpio a la cámara de sensores.
Contenedor Dopante	Dopante	Lleno (2 ml)	Contiene el dopante.
Contenedor Muestra	Muestra	Lleno (1 g)	Contiene la muestra de explosivo a analizar.
Cámara de Sensores	Cámara de sensores	--	Se llena para analizar la muestra.
Compresor	Compresor	Encendido	Suministra el aire al sistema de respiración

b) Proceso de limpieza del sistema:

La importancia en el proceso de limpieza radica en la optimización del tiempo entre experimentos, disminuir el tiempo de limpieza significa un menor tiempo entre experimentos y por ende alta productividad del dispositivo.

Para solucionar el problema del tiempo de limpieza se implementó un sistema que permitió el cierre de la circulación de aire contaminado con la muestra explosiva, además de un sistema que introduce aire limpio a la cámara de sensores y un disipador de aire sobre la cámara que facilita la salida de aire contaminado de la cámara de sensores. El diagrama de flujo del proceso de limpieza se muestra en la **Figura 33**, es importante mencionar que para una lectura óptima se realizó previamente la absorción de aire en los

dos contenedores (dopante y muestra), y de esta manera garantizar la limpieza total del dispositivo.

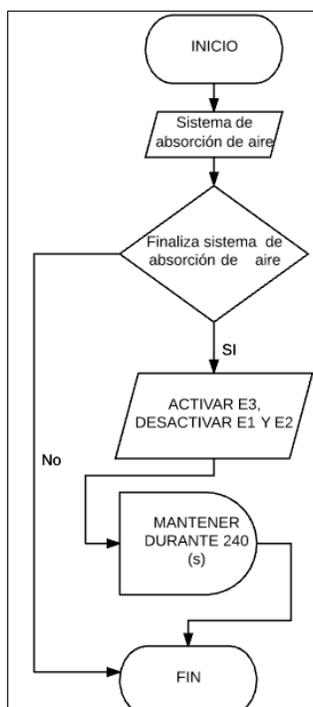


Figura 33 Diagrama de flujo subproceso de limpieza

Para evitar la contaminación de los contenedores de dopante y muestra en el proceso de limpieza, se colocó una electroválvula más al diseño inicial del dispositivo (E3), esto principalmente con el objetivo de evitar el regreso del aire cuando se genera la limpieza, como se muestra en la **Figura 34**.

Es importante resaltar que cuando se realiza el proceso de limpieza del sistema la electroválvula E2 está cerrada, evitando así que se contamine la muestra (sustancia explosiva a analizar). Esto permite que el proceso de limpieza cumpla con la función de limpiar únicamente la cámara de sensores.

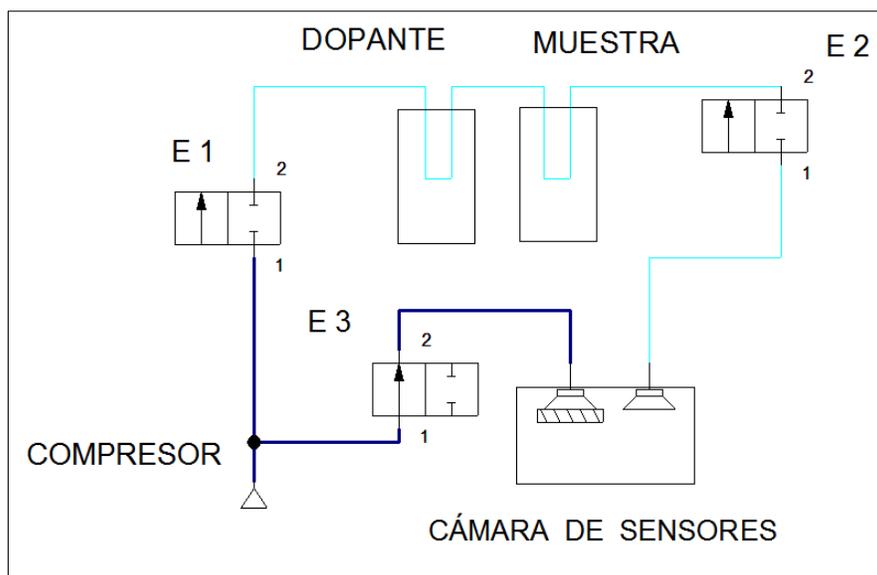


Figura 34 Esquema subproceso de limpieza del dispositivo

c) Secuencia de respiración del dispositivo

La secuencia de respiración del dispositivo está conformada por el proceso de aspiración y el proceso de limpieza, en los cuales se validan las condiciones para comenzar el experimento, la secuencia de respiración se muestra en la **Figura 35**.

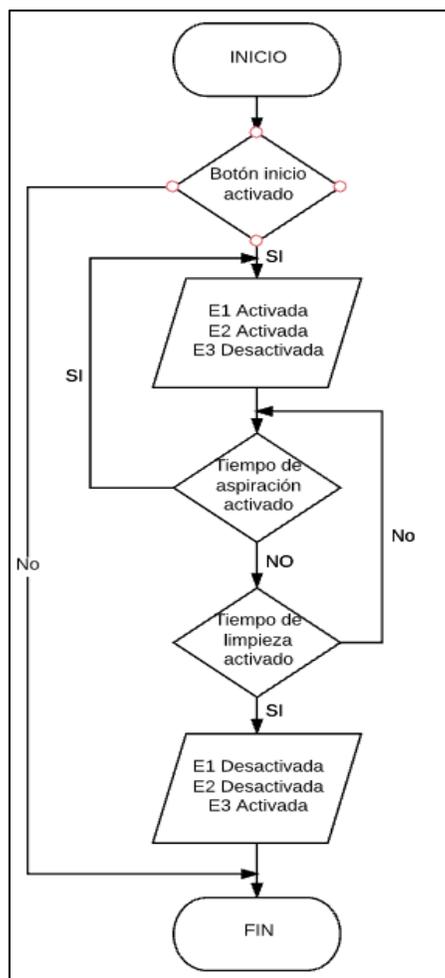


Figura 35 Diagrama de flujo de la secuencia de respiración de la nariz electrónica

5.2 Diseño y dimensionamiento de componentes para el proceso óptimo de respiración del dispositivo

Para el proceso de respiración de la nariz electrónica se realizó un análisis de la influencia de cambios de diámetro en el proceso de respiración. Además se determinó el dimensionamiento del compresor de aire que proporcionará el flujo adecuado, con la finalidad de distribuir el dopante y la muestra a analizar hacia la cámara de sensores.

Para el diseño y dimensionamiento de los componentes, se utilizaron los siguientes términos relacionados con neumática:

- Flujo volumétrico real (Q_a): Es la velocidad de flujo de aire a presión y temperatura distinta a la estándar.
- Flujo volumétrico estándar (Q_s): Es la velocidad de flujo de aire en condiciones estándar, es decir a presión atmosférica y temperatura estándar.
- Presión atmosférica absoluta estándar (P_{atm-s}): Es la presión de un fluido medido con referencia al cero absoluto en condiciones estándar.
- Presión atmosférica absoluta real (P_{atm}): Es la presión de un fluido medido con referencia al cero absoluto.
- Presión real de medición (P_a): Es la presión barométrica a la que se encuentra el sistema de respiración.
- Temperatura absoluta real (T_a): Es la temperatura real del sistema medida con respecto a una escala que comienza en el cero absoluto.
- Temperatura absoluta estándar (T_s): Es la temperatura a condición estándar medida con respecto a una escala que comienza en el cero absoluto.

Tomado de: (Mott, 2006)

5.3 Metodología Experimental

El proceso de respiración del dispositivo se produce debido a la existencia de un flujo de aire, que provoca la transferencia de alcohol (Dopante) y muestra a analizar hacia la cámara de sensores. Por lo tanto al producirse un cambio de presión como consecuencia de la variación de diámetros, se debe analizar la variación de las características del aire.

El sistema de respiración del dispositivo tiene la función de arrastrar la muestra explosiva hacia la cámara de sensores, esta se encuentra conformada por electroválvulas que permiten el control de la secuencia, en las cuales se produce un cambio de área y

cambio de sección. Debido a estas variaciones existen caídas de presión en el sistema que se muestran en la **Tabla 30**.

Tabla 30
Caídas de presión en el sistema de respiración

Elementos en la línea de aire	Caída de Presión [PSI]
Sin electroválvulas	0
Con 1 electroválvula	8.19
Con 2 electroválvulas	27.84
2 electroválvulas y cambio de diámetros en el contenedor de dopante	65.52

En la **Tabla 30** se verifica la importancia de evitar variaciones de área en el sistema de respiración del dispositivo. Sin embargo se utilizaron 2 electroválvulas para evitar la pérdida de información de la muestra a analizar y tener un adecuado control de la secuencia de respiración y limpieza.

El flujo volumétrico del compresor de aire se verá afectado debido a la variación de parámetros como temperatura y presión en el dispositivo. A continuación se presenta un análisis respecto al cambio de flujo volumétrico debido a la variación de presión.

5.4 Ecuaciones utilizadas para la determinación de flujo volumétrico necesario en el dispositivo

Los valores de aire que entregan los equipos de compresión se proporcionan en términos de aire libre, es decir, el aire que se entrega por unidad de tiempo se encuentra a presión atmosférica estándar (Mott, 2006). Para obtener la velocidad de flujo en otras condiciones se utiliza la (Ec. 5. 1).

$$Q_a = Q_s * \frac{P_{atm-s}}{P_{atm} + P_a} * \frac{T_a}{T_s} \quad (\text{Ec. 5. 1})$$

- Q_a : Flujo volumétrico real
- Q_s : Flujo volumétrico estándar
- P_{atm-s} : Presión absoluta atmosférica estándar
- P_{atm} : Presión atmosférica real
- P_a : Presión real de medición (manométrica)
- T_a : Temperatura absoluta real
- T_s : Temperatura absoluta estándar

$$0.038 \frac{pie^3}{min} = Q_s * \frac{14.7}{14.7 + 27.84} * \frac{T_a}{T_s}$$

$$Q_s = 0.1059 \frac{pie^3}{min} = 3 \frac{L}{min}$$

5.5 Valores de parámetros utilizados en el diseño y dimensionamiento de partes del sistema

Para los valores de presiones mostrados en la **Tabla 30**, se calcularon mediante la (Ec. 5. 1) los valores de flujo volumétrico estándar que debe proporcionar el compresor para obtener un flujo volumétrico real propuesto de 1.1 L/min y se utilizaron los parámetros mostrados en la **Tabla 31**.

Tabla 31
Parámetros utilizados en el dimensionamiento del compresor

Parámetro	Unidades	Valor
Flujo volumétrico real	Pie ³ /min	$Q_a: 1.1 = 0.038$
Flujo volumétrico estándar	Pie ³ /min	$P_{atm-s}: 14.7 \text{ PSI}$
Presión absoluta atmosférica estándar	PSI	$P_{atm}: 14.7$
Presión atmosférica real	PSI	$P_a: 27.84$
Temperatura absoluta real	°R	$T_a: 540 \text{ °R}$
Temperatura absoluta estándar	°R	$T_s: 520 \text{ °R}$

5.6 Dimensionamiento del compresor de aire

A continuación con los datos obtenidos de la **Tabla 31** se procede a realizar la selección del compresor de aire, para ello se resumen en la **Tabla 32**, los parámetros principales en este apartado de selección.

Tabla 32
Resumen de parámetros de selección del compresor

PARÁMETRO	DIMENSIÓN
Flujo volumétrico	3 l/min
Presión manométrica	1.8 bares
Voltaje	110 v AC

Otros de los parámetros fundamentales para la selección del compresor que fueron tomados en cuenta fueron: que cuente con dos salidas de aire, sea bajo costo, genere bajo ruido, tenga tamaño reducido y sea fácil de conseguir en el mercado local, con estas referencias el compresor seleccionado fue: “Silent air PUMP SE-314”.



Figura 36 Compresor Silent air PUMP SE-314

Fuente: (Boyuaquarium, 2014)

5.7 Análisis de la variación de diámetros en el sistema de nariz electrónica

El flujo volumétrico estándar que se obtuvo es de 3 L/min, este flujo volumétrico es el que debe proporcionar el compresor, para obtener un flujo volumétrico real de 1.1 L/min

a las condiciones antes mencionadas. Pero al realizarse cambios en las dimensiones de los contenedores de dopante y muestra a analizar, se presenta una reducción del flujo volumétrico real. La variación en las dimensiones de los contenedores es únicamente de 4 a 0.5 mm en el diámetro, en la **Tabla 33** se encuentran el valor del flujo volumétrico real al realizarse estas variaciones.

Tabla 33
Valor del flujo volumétrico real en el sistema de respiración

Cambios de diámetros [mm]	Caída de Presión [PSI]	Flujo volumétrico real Q_a [L/min]
ØEntrada-Øpaso1-Øpaso2-Øsalida	-	-
4 - 4- 4 - 4	27.84	1.1
4 - 0.5 - 4 - 4	214	0.2
4 - 4 - 0.5 - 4	443	0.1
4 - 0.5 - 0.5 - 4	++	--

Como se muestra en la **Tabla 33** al no existir variación de diámetros en el contenedor del dopante, se garantizó que el flujo de 1.1 L/min llegue a la cámara de sensores con la muestra a analizar.

5.8 Experimentación

Al realizar los experimentos se tomó como referencia la secuencia de respiración expuesta en la **Tabla 34**, donde se encuentran los tiempos de absorción y limpieza.

Tabla 34
Secuencia de respiración para el experimento

SECUENCIA EXPERIMENTO		
N°	ESTADO	TIEMPO (S)
0	LIMPIA	90
1	ABSORBE	60
	LIMPIA	90
2	ABSORBE	60
	LIMPIA	90
3	ABSORBE	60
	LIMPIA	90
4	ABSORBE	60
	LIMPIA	90
5	ABSORBE	60
	LIMPIA	90
Tiempo total		840

Para la experimentación del análisis de la variación de flujo volumétrico debido a los cambios de diámetros en el sistema, se modificaron varios modelos en la entrada y salida de los contenedores de dopante y muestra, como se observa en la **Tabla 35**. Siendo el experimento (a) el que más variaciones presenta y el experimento (d) aquel que no presenta variaciones, para una mejor comprensión del experimento, en la **Figura 37** se identifica la variación de diámetros en los contenedores.

Tabla 35
Combinaciones de diámetros en contenedores

COMBINACIONES				
Experimento	Ø Entrada (mm)	Ø Paso 1 (mm)	Ø Paso 2 (mm)	Ø salida (mm)
A	4	0.5	0.5	4
B	4	0.5	4	4
C	4	4	0.5	4
D	4	4	4	4

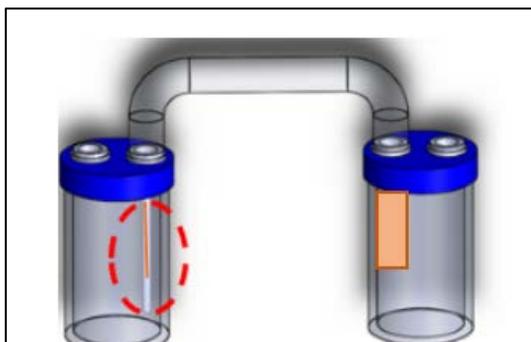


Figura 37 Variación de diámetros del contenedor

Para realizar los experimentos en el laboratorio se realizó el diseño según el número de variables, en este caso al ser 4 variables (diámetros de entrada, paso 1, paso 2 y de salida) se utilizó el método 2^k , es decir 16 experimentos, en la **Tabla 36** se identifican los 2 primeros experimentos, además de la hora en que se los realizó

Tabla 36
Diseño 2 primeros experimentos variación de diámetros

Experimentos 1				
Fecha	Experimento	Hora inicio	Hora fin	
Martes 16/05/2017	C	10:30	10:44	
Martes 16/05/2017	B	10:15	10:29	
Martes 16/05/2017	D	11:00	11:14	
Martes 16/05/2017	A	11:30	11:44	
Martes 16/05/2017	B	10:15	10:29	
Martes 16/05/2017	D	11:00	11:14	
Martes 16/05/2017	C	10:30	10:44	
Martes 16/05/2017	A	11:30	11:44	

Para diseño experimental se tomó en cuenta los siguientes parámetros:

1. Hora del día: en la misma franja horaria del día, desde las 08:00 hasta las 11:45 am.
2. Lugar de experimentación: Laboratorio de Electrónica 4 x 6 m²
3. Cantidad de sustancia dopante: 2ml de alcohol

4. Cantidad de muestra: 2g de TNT
5. Tiempo de experimentación: Treinta minutos (5 min.), con absorción constante.
6. Orden Aleatorio, para evitar el efecto memoria

La temperatura del ambiente no fue tomada en cuenta debido a que el control de la misma se realiza posterior al ingreso del fluido en la cámara de sensores, sin embargo cabe recalcar que no existieron variaciones considerables en la temperatura del ambiente, que puedan ser relevantes en el flujo volumétrico del fluido.

El proceso para el experimento fue el siguiente:

- Se Ejecutó el programa desarrollado para encender el dispositivo y empezar con el proceso de absorción.
- Se colocaron 2g de TNT en uno de los contenedores, y 2ml de alcohol en el otro contenedor.
- Se conectó el flujómetro en la entrada de la cámara de sensores para verificar el flujo volumétrico que existe en este.
- Se activó el sistema de absorción durante un tiempo de 1 minuto, en el cual el dispositivo enviará el flujo de aire hacia la cámara de sensores.
- Se tomó visualmente el valor de flujo en el instrumento de medición colocado previamente, y a anotar sus datos.
- Se guardó los datos de los sensores de gas en el programa realizado con el fin de analizar los picos de absorción posteriormente y verificar si el flujo tiene que ver con la señal de lectura de los sensores.

5.9 Resultados

A continuación en la **Figura 38** y en la **Tabla 37** se muestran los resultados obtenidos experimentalmente del flujo volumétrico del flujo de aire a la entrada de la cámara de sensores de las diferentes combinaciones, se obtiene como resultado un análisis esperado por los cálculos realizados anteriormente, la combinación que obtuvo un mayor flujo volumétrico de flujo a la entrada de la cámara de sensores fue la combinación “D” donde

no existía cambio de diámetros es decir el diámetro de 4 mm fue constante en todo el sistema, el dispositivo inicial contaba con una combinación “A”, que resultó ser la menos eficiente al medir el flujo de entrada a la cámara.

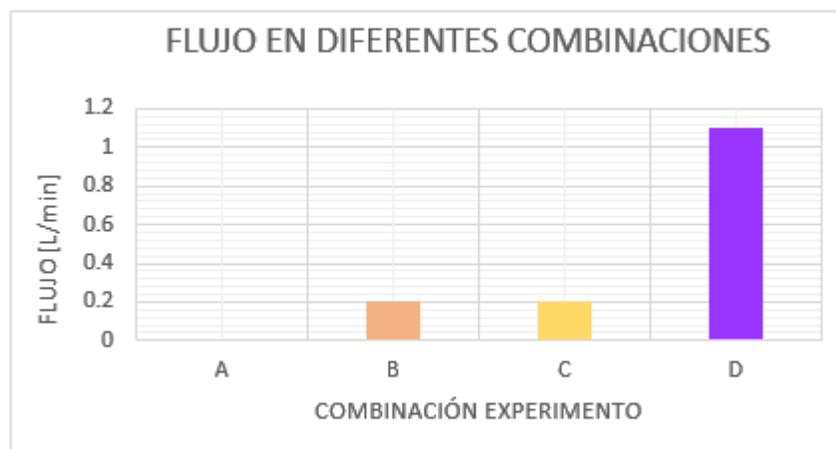


Figura 38 Flujos volumétricos medidos en diferentes combinaciones de diámetros

Tabla 37
Flujos volumétricos medidos en diferentes combinaciones de diámetros

EXP.	\varnothing Entrada (mm)	\varnothing Paso 1 (mm)	\varnothing Paso 2 (mm)	\varnothing salida (mm)	FLUJO MEDIO [L/min]
A	4	0.5	0.5	4	<math><0.1</math>
B	4	0.5	4	4	0.2
C	4	4	0.5	4	0.2
D	4	4	4	4	1.1

En **Figura 39** se muestran las lecturas que realizó el sensor 1 de gas Figaro TGS 825, durante un experimento sometido a periodos de absorción y limpieza y a las diferentes combinaciones de diámetro.

En las lecturas se observa que la señal llega a valor máximo en la combinación de diámetros “D” que es donde los mismos se mantienen a 4mm constantes en todo el

sistema, sin embargo la peor combinación según la lectura del sensor es la combinación “B”, lo cual es un resultado esperado por la cantidad de flujo que ingresa a la cámara.

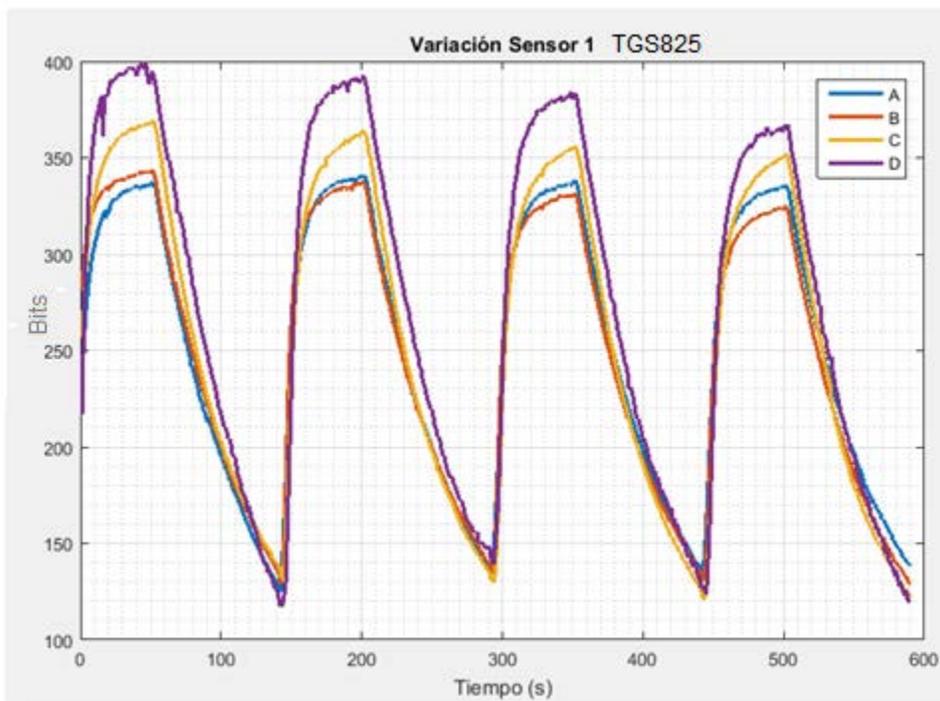


Figura 39 Resultados lectura de sensores variación de diámetros

La **Figura 39** muestra que cambiar los diámetros a su mayor valor (4mm) en todo el sistema es positivo, debido q al reducir el cambio de diámetros se aprovecha todo el flujo que se puede transportar y se evita considerablemente la pérdida de información.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la integración del dispositivo, después de haber realizado diversas pruebas; entre ellas someter el prototipo a una temperatura baja y ver el grado de afectación a los sensores de olor, colocar diferentes sustancias explosivas y no explosivas para analizar la respuesta del prototipo; finalmente se presenta un resumen de costos del prototipo y una manual de cómo utilizar correctamente el dispositivo.

6.1 Integración del prototipo

Las mejoras realizadas en el proyecto se describieron en base de estudios realizados en los capítulos anteriores, gracias a dichas mejoras se obtuvo un prototipo compacto y portable, las mejoras al prototipo incluyen: estudio de ciencias de materiales para escoger el material adecuado de la cámara de sensores, estudio de mecánica de fluidos para mejorar el proceso de respiración de la nariz electrónica, estudio de transferencia convectiva de masa para incluir un método de dopaje automático y el diseño de un sistema de control de temperatura para garantizar el funcionamiento del dispositivo en cualquier ambiente.



Figura 40 Prototipo inicial de nariz electrónica E-NOSE

Fuente: (López Hernández, 2016)

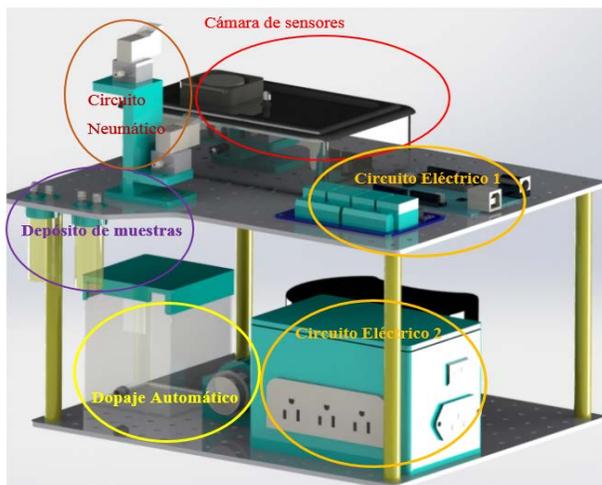


Figura 41 Esquema partes del sistema E-NOSE nariz electrónica desarrollada

Respecto al prototipo inicial mostrado en la **Figura 40**, como se mencionó antes se realizaron varias mejoras; para poder comprender la integración del prototipo final E-NOSE, en la **Figura 41** se muestran las diferentes partes del sistema, las cuales se explican a continuación:

1. Cámara de sensores



Figura 42 Cámara de sensores

En la **Figura 42** se muestra la cámara de sensores desarrollada donde se realizaron tres mejoras considerables, la primera mejora fue el estudio del material con el que está realizada la cámara; la segunda mejora incluye la implementación de un sistema de temperatura que favorezca la toma de datos de los sensores incluidos en la cámara,

La tercera mejora incluyó un ventilador el cual mediante agujeros en la cámara de sensores facilita la limpieza de la misma al momento cambiar la muestra a analizar.

2. Circuito eléctrico

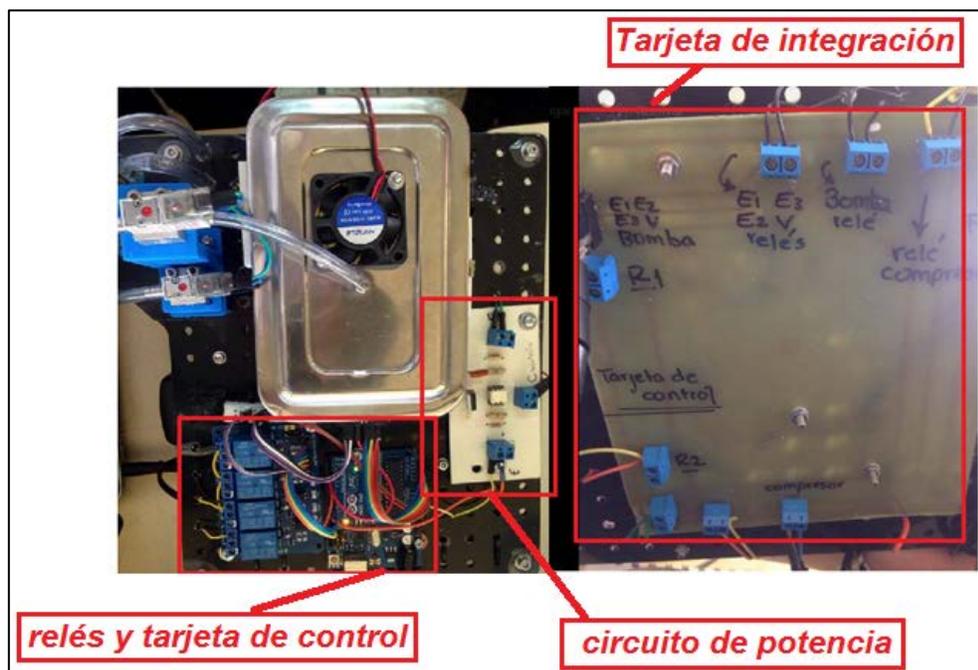


Figura 43 Circuitos electrónicos E-NOSE

En la **Figura 43**; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los circuitos electrónicos que se implementaron como mejora en el dispositivo, estos circuitos incluyen una tarjeta en la cual se integraron tanto las partes de potencia como de control para evitar problemas en la comunicación del sistema nariz electrónica, una tarjeta de potencia para el control de temperatura y los elementos electrónicos que dirigen el funcionamiento de las electroválvulas y la tarjeta de adquisición de datos.

3. Circuito Neumático

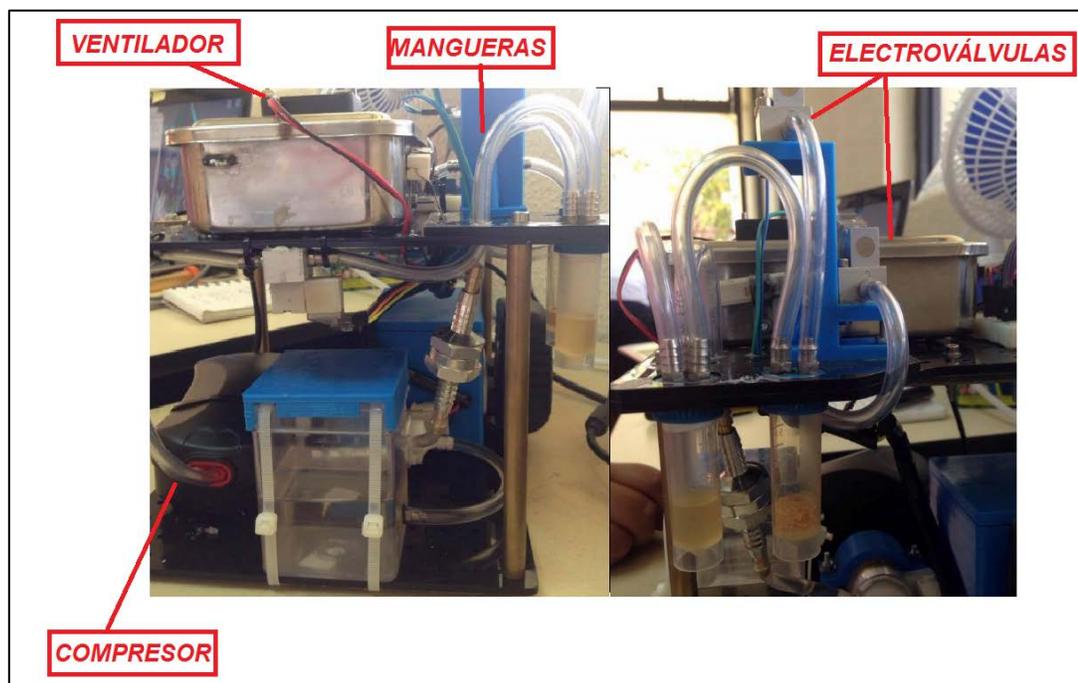


Figura 44 Circuito neumático E-NOSE

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el circuito neumático donde se aprecian las mangueras, los acoples, las electroválvulas y el compresor que realizan la función de respiración del sistema. En la parte neumática se realizó una mejora en el aspecto del estudio de flujo que llegaba a la cámara de sensores por el cambio de diámetros que posee el sistema. Como optimización del sistema se desarrolló un medio de arrastre de sustancia a analizar hacia la cámara de sensores y un estudio de la respiración adecuada del dispositivo así como el elemento principal de la respiración: el compresor.

4. Dopaje Automático



Figura 45 Parte del dopaje automático

El prototipo desarrollado cuenta con un sistema de dopaje automático, el cual es necesario para no alterar una muestra cuando esta va a ser analizada, en el *CAPÍTULO IV*, se realizó un estudio completo del impacto que tiene colocar el dopaje de manera externa a la muestra, cuyo resultado fue que se puede realizar un dopaje.

5. Depósito de muestras



Figura 46 Depósito de muestras

La **Figura 46** muestra la parte de depósito de muestras donde se coloca la muestra a analizar y el dopante en este caso alcohol comercial, esta mejora es una parte nueva en el dispositivo y permite manipular la muestra sin alterarla.

6. Interfaz de adquisición de datos

En la **Figura 47** se muestra la interfaz de inicio del programa E-NOSE y en la **Figura 48** se muestra la interfaz diseñada para la adquisición de datos del sistema de nariz electrónica, este programa permite exportar los datos obtenidos por los sensores de olor para su posterior procesamiento y detección de olor específico.



Figura 47 Interfaz inicial adquisición de datos

Parámetros como: fecha, hora, temperatura, humedad y cada sensor

Fecha	Hora	Segundos	Humedad %	Temperatura °C	Sensor 1 (B20)	Sensor 2 (B22)	Sensor 3 (B20)	Sensor 4 (B21)	Sensor 5 (B26)	Sensor 6 (B22)
10/7/2017	11:52:12	1	14.0	29.0	474.0	361.0	214.0	241.0	270.0	224.0
10/7/2017	11:52:17	6	14.0	29.0	476.0	359.0	212.0	239.0	268.0	222.0
10/7/2017	11:52:18	7	14.0	29.0	476.0	359.0	212.0	239.0	268.0	222.0
10/7/2017	11:52:19	8	14.0	30.0	483.0	359.0	210.0	235.0	265.0	217.0
10/7/2017	11:52:20	9	14.0	29.0	480.0	357.0	208.0	235.0	264.0	215.0
10/7/2017	11:52:22	11	14.0	29.0	480.0	359.0	208.0	234.0	262.0	214.0
10/7/2017	11:52:23	12	14.0	30.0	485.0	363.0	207.0	233.0	260.0	213.0
10/7/2017	11:52:24	13	14.0	30.0	484.0	361.0	207.0	232.0	258.0	212.0
10/7/2017	11:52:25	14	14.0	30.0	482.0	359.0	206.0	230.0	258.0	211.0
10/7/2017	11:52:27	16	14.0	30.0	480.0	357.0	205.0	230.0	257.0	210.0
10/7/2017	11:52:28	17	14.0	29.0	480.0	357.0	205.0	230.0	255.0	209.0
10/7/2017	11:52:29	18	14.0	30.0	488.0	359.0	204.0	230.0	255.0	208.0
10/7/2017	11:52:30	19	14.0	29.0	487.0	357.0	204.0	230.0	254.0	208.0
10/7/2017	11:52:32	21	14.0	29.0	486.0	357.0	204.0	230.0	254.0	208.0
10/7/2017	11:52:33	22	14.0	30.0	486.0	357.0	204.0	230.0	253.0	207.0
10/7/2017	11:52:34	23	14.0	30.0	484.0	357.0	203.0	230.0	253.0	207.0
10/7/2017	11:52:35	24	14.0	30.0	484.0	357.0	203.0	230.0	253.0	207.0
10/7/2017	11:52:36	25	14.0	30.0	484.0	357.0	203.0	230.0	253.0	207.0
10/7/2017	11:52:37	26	14.0	30.0	484.0	357.0	203.0	230.0	253.0	207.0
10/7/2017	11:52:38	27	14.0	29.0	483.0	357.0	202.0	230.0	252.0	207.0
10/7/2017	11:52:39	28	14.0	29.0	482.0	357.0	202.0	230.0	252.0	207.0
10/7/2017	11:52:40	29	14.0	29.0	482.0	357.0	202.0	230.0	251.0	206.0
10/7/2017	11:52:41	30	14.0	29.0	482.0	357.0	202.0	230.0	251.0	206.0
10/7/2017	11:52:42	31	14.0	30.0	480.0	357.0	202.0	230.0	251.0	206.0
10/7/2017	11:52:43	32	14.0	30.0	480.0	357.0	202.0	230.0	251.0	206.0
10/7/2017	11:52:44	33	14.0	30.0	480.0	357.0	202.0	230.0	251.0	206.0
10/7/2017	11:52:45	34	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:46	35	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:47	36	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:48	37	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:49	38	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:51	40	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:52	41	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:53	42	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:54	43	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:55	44	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:56	45	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:57	46	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:52:58	47	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:00	49	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:01	50	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:02	51	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:03	52	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:04	53	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:05	54	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:06	55	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:07	56	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:08	57	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:09	58	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:10	59	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:11	60	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:12	61	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:13	62	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:14	63	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:15	64	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0
10/7/2017	11:53:16	65	14.0	30.0	481.0	357.0	203.0	230.0	250.0	205.0

ESTADO DEL SISTEMA

EJECUTANDO █

PAUSADO █

FINALIZADO █

MANDOS DEL SISTEMA

INICIAR

PAUSAR

EXPORTAR DATOS

DOPAR

MANDOS DEL SISTEMA

CONSIDERACIONES

- Chequeo de hardware
- Chequeo de conexión a internet
- Tiempo de espera: 5 min
- 1 minuto de espera
- 1 minuto de espera
- Tiempo total: 17 minutos
- Cálculo de datos

Figura 48 Interfaz principal de adquisición de datos

La **Figura 49** presenta una imagen real del dispositivo completo e integrado desarrollado.

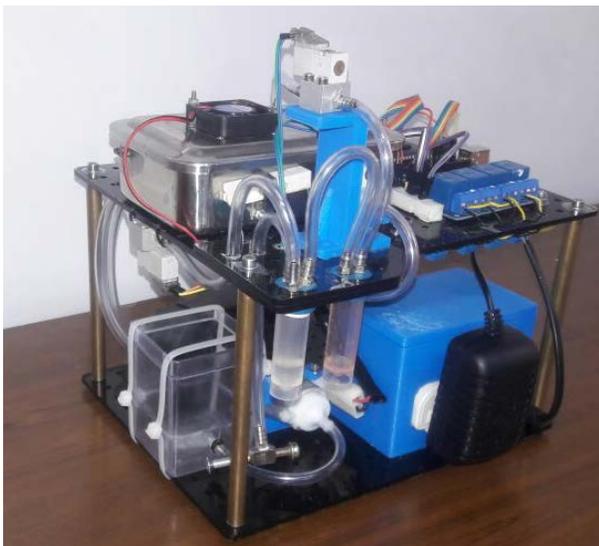


Figura 49 Prototipo E-NOSE con dopaje automático desarrollado

Como parte de la implementación e integración completa del sistema se explica a continuación como realizar un análisis de muestras paso a paso:

1. Conectar el dispositivo al computador y a la toma de 110V



Figura 50 Conexión del dispositivo al computador y a la toma de 110 V

2. Verificar si el deposito principal de alcohol está lleno
 - a. En caso de que el contenedor esté vacío llenar hasta el indicador



Figura 51 Colocación de dopante en el contenedor principal

- b. En caso de que el contenedor esté lleno seguir con los siguientes pasos



Figura 52 Contenedor de alcohol

3. Encender el sistema completo



Figura 53 Botón de encendido del dispositivo

4. Colocar la muestra y el depósito de dopante en el lugar indicado



Figura 54 Colocación de depósito de muestra y dopante

Recordar que el equipo está diseñado para realizar los experimentos con 2g de muestra.

5. Abrir la aplicación realizada para la toma de datos que se indica en la **Figura 47**
6. Seguir las indicaciones de la interfaz e iniciar el experimento que se indica en la **Figura 48**
7. Una vez terminado el experimento, el sistema indicará que se pueden exportar los datos.
8. Exportar datos para su posterior análisis.

6.2 Experimentación

6.2.1 Afectación de la temperatura en la lectura de los sensores

Como parte de las pruebas finales en el estudio del dispositivo integrado, se procedió a realizar tres experimentos con y sin control de temperatura, el objetivo principal de este experimento es conocer si los sensores de olor presentan afectación en sus lecturas en ambientes fríos y calientes sin controlador y el tipo de respuesta usando control de temperatura, lo que se analizó es la repetibilidad de las medidas de los sensores, que se refieren a la similitud entre medidas de respuesta transitoria; así como su valor máximo en cada lectura.

Los experimentos realizados se detallan a continuación:

1. Experimento lectura y análisis de muestra TNT, temperatura ambiente (preferiblemente frío 16°C) sin control de temperatura, dos réplicas de análisis.
2. Experimento lectura y análisis de muestra TNT, temperatura ambiente (preferiblemente caliente 45°C) sin control de temperatura, dos réplicas de análisis.
3. Experimento lectura y análisis de muestra TNT, temperatura controlada 29°C ambiente, dos réplicas de análisis.

El procedimiento que se llevó a cabo para la experimentación, es el siguiente:

- Hora del día: en la misma franja horaria del día, desde las 08:00 hasta las 11:30 am.
- Lugar de experimentación: Laboratorio de Electrónica 4 x 6 m²
- Cantidad de sustancia dopante: 2ml de alcohol
- Cantidad de sustancia a analizar: TNT 2gr
- Tiempo de experimentación: Treinta y cuatro (34 min.), con cuatro réplicas de respiración continua y cinco etapas de limpieza.
- Orden Experimentación: Aleatoria, para evitar el efecto memoria

6.2.2 Dispositivo expuesto a muestras de olores diferentes

El segundo experimento fue realizar como prueba de funcionamiento del dispositivo, la exposición y análisis de diferentes sustancias. El objetivo del experimento es determinar si el TNT muestra un comportamiento diferente a otras muestras comunes y diferentes como:

1. Manzana
2. Harina de trigo
3. Jabón

A continuación se explica el procedimiento que se llevó a cabo para la experimentación:

- Hora del día: en la misma franja horaria del día, desde las 08:00 hasta las 11:30 am.
- Lugar de experimentación: Laboratorio de Electrónica 4 x 6 m²
- Cantidad de sustancia constante: 2ml de alcohol
- Tiempo de experimentación: diecisiete minutos (17 min.), con dos réplicas de respiración continua y tres etapas de limpieza.
- Orden Experimentación: Aleatoria, para evitar el efecto memoria
- 2 gr de cada sustancia a analizar: 2gr de harina, 2gr de TNT, 2gr de jabón y 2gr de manzana.

6.3 Análisis de resultados del prototipo completo

6.3.1 Sistema de control de temperatura en la cámara de sensores

La **Figura 55** muestra una combinación de las lecturas de todos los sensores en tres graficas de experimentos de respiración realizadas en diferentes condiciones. La gráfica en color azul representa un experimento realizado a una temperatura controlada de 29°C, la gráfica amarilla representa el experimento a 45°C es decir una temperatura alta sin control y la gráfica naranja representa el mismo experimento de respiración realizado a una temperatura baja de 16°C sin control; se puede observar las diferencias entre los valores picos de cada sensor, además la variación en algunos casos de la repetibilidad en las réplicas de cada lectura, lo que confirmó la decisión de haber agregado un sistema de control de temperatura al sistema, la **Figura 56** muestra con claridad lo que ocurre con la respuesta de uno de los sensores.

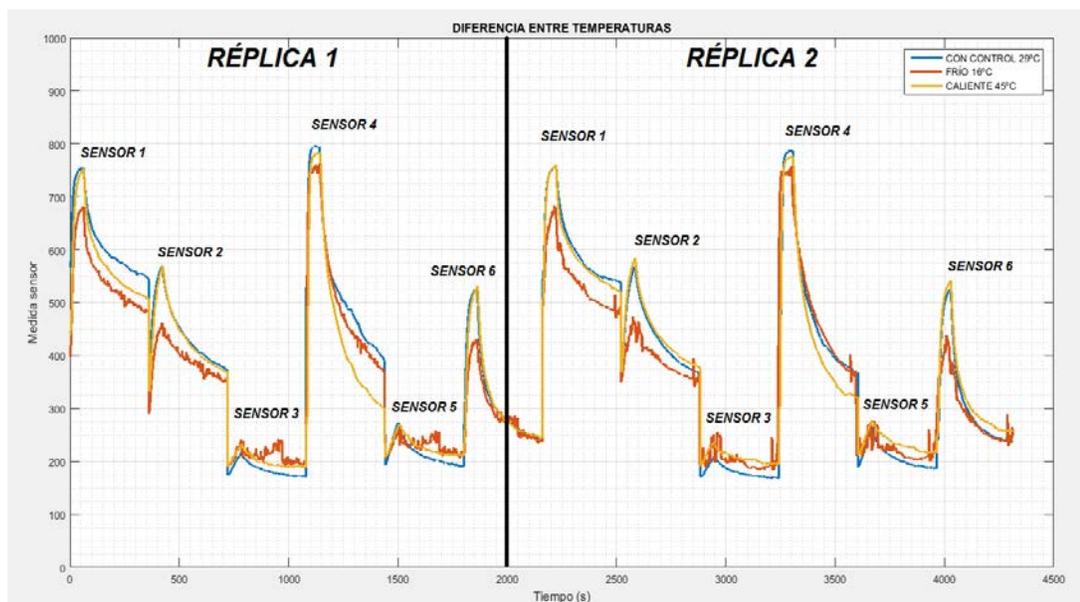


Figura 55 Diferencias entre mediciones del sistema a bajas temperaturas sin controlador y a una temperatura controlada

La **Figura 56** muestra las señales adquiridas por el sensor 5 en tres condiciones diferentes, con control de temperatura a 29° C en color azul, con 16°C en color naranja y con 45°C en color amarillo. En la gráfica se observó que en las señales de los experimentos que no poseen sistema de control existe más ruido o perturbaciones que en la señal del experimento con control de temperatura. Otro análisis importante es la comparación de los valores máximos, donde el experimento con controlador mantiene su valor pico en las 2 réplicas realizadas, lo que no ocurre con los experimentos sin control. Otra característica importante que se observó en la gráfica es la repetibilidad de la señal en las réplicas realizadas en el experimento, en la señal del experimento con controlador es notable la similitud en las réplicas, lo que proporciona repetibilidad; mientras que en las otras señales especialmente la de temperatura baja sin control a 16°C se muestra que la lectura del sensor no es repetible ya que las réplicas no son similares y no se distingue un inicio y un fin.

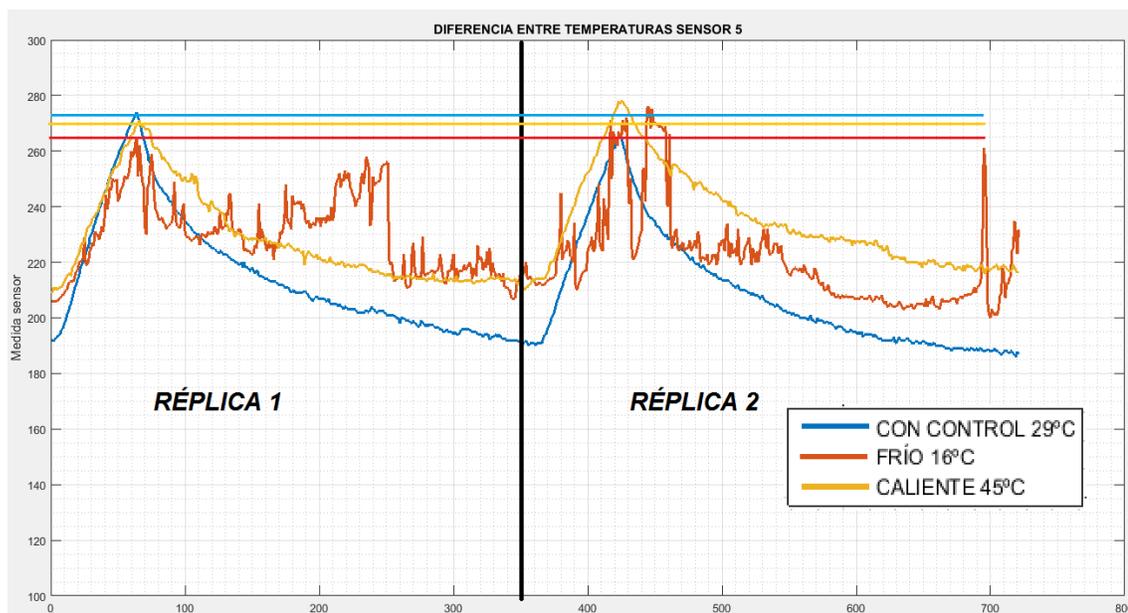


Figura 56 Diferencia de lectura de sensor 2 TGS-822 a bajas temperaturas, a una temperatura controlada y a altas temperaturas

Como conclusión se puede afirmar que el control de temperatura si fue necesario, debido principalmente a la garantía que ofrece la repetibilidad de las lecturas en los experimentos; así también el sensor 5 refleja que un control de temperatura puede favorecer en la adquisición de datos respecto a su valor máximo de la señal adquirida y su efecto al atenuar el ruido y perturbaciones de la señal.

6.3.2 Diferenciación entre TNT y otras muestras

En la **Figura 57** se muestran gráficamente un conjunto de datos recogidos por el programa de adquisición de datos del dispositivo sometido a diversas sustancias; en color azul se muestra la harina, en color naranja la manzana, en color amarillo el jabón y finalmente en color púrpura el TNT.

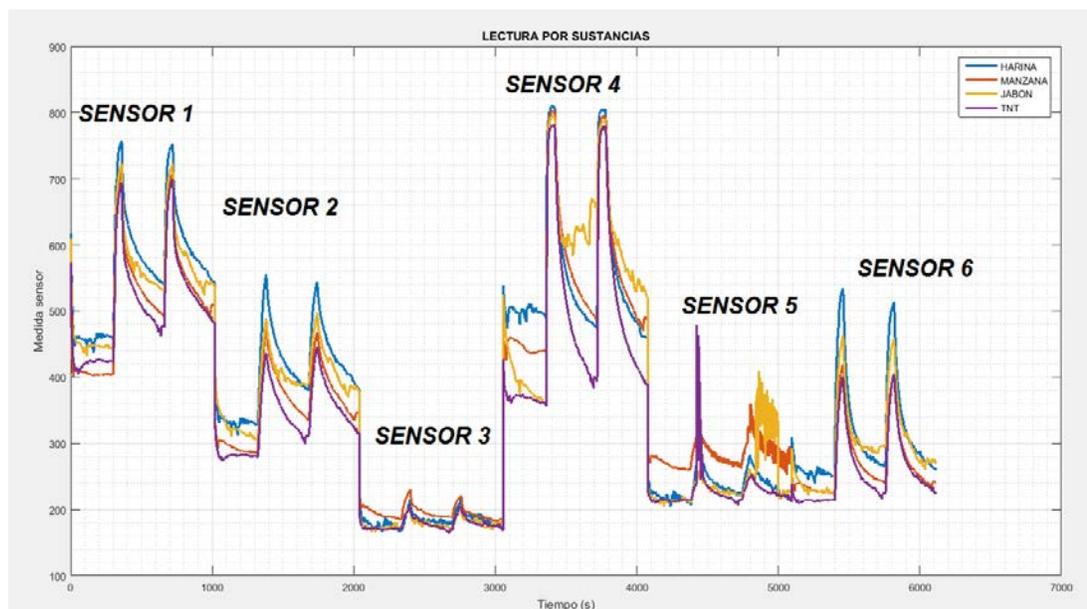


Figura 57 Diferencias entre TNT y otras sustancias

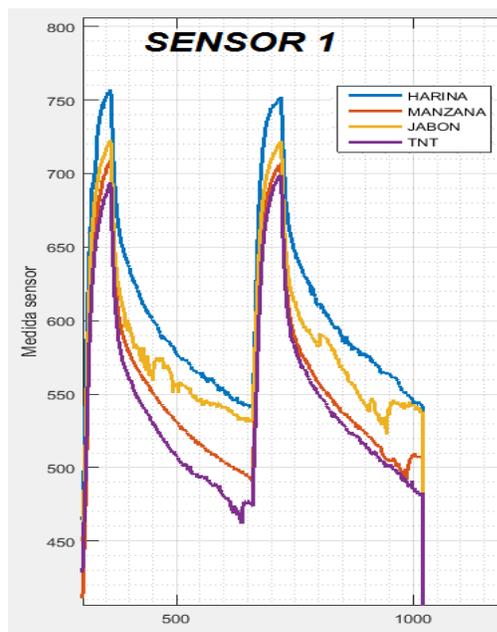


Figura 58 Señales sensor 1 de diferentes sustancias

Visualmente en la **Figura 58** se observa que la respuesta de los sensores es diferente en función de la muestra a analizar, se observa también que según cada sustancia el valor

máximo es distinto y la curva para llegar al valor de referencia también varía, es decir la respuesta transitoria es diferente en cada caso; las diferencias señales analizadas gráficamente deben ser estudiadas usando técnicas de aprendizaje de máquina para proveer una respuesta de diferencia importante entre sustancias.

Se determina que el dispositivo está preparado para una segunda fase de diseño que determinará mediante modelos matemáticos y estadísticos la sustancia que se ha analizado, ya que en este proyecto el método de determinación se ha realizado únicamente de manera gráfica.

6.3.3 Respiración del dispositivo

Para calcular el porcentaje de mejora en la respiración del dispositivo se realizó una comparación entre el tiempo inicial de respiración para cada experimento y el tiempo actual que se determinó posterior al estudio de fluidos del dispositivo, como se muestra en la **Tabla 38**.

Tabla 38
Tiempos de respiración en el dispositivo

CARACTERÍSTICA	PROTOTIPO INICIAL	PROTOTIPO ACTUAL
Tiempo de experimentación	60 min	17min

$$\text{minutos ahorro} = 60 - 17 = 43 \text{ min}$$

Si 17 minutos es 100%, entonces el prototipo ha mejorado en un 36% su proceso de respiración.

6.3.4 Mejora prototipo inicial

Para conocer el porcentaje de mejora del prototipo se realizó una tabla de puntajes la cual se muestra en la **Tabla 39**, en la cual de acuerdo al criterio de los diseñadores se han

otorgado puntos sobre 100 en diferentes características al prototipo actual y al prototipo mejorado.

Tabla 39
Comparación prototipo inicial, prototipo actual

CARACTERÍSTICA	PROTOTIPO INICIAL /100	PROTOTIPO ACTUAL/100
Portabilidad	0	100
Dopaje automático	0	100
Control de temperatura	0	100
Análisis de material	0	100
Estudio de fluidos	0	100
Análisis externo de datos	100	100
Modelo específico Pólvora	100	0
Modelo específico TNT	100	50
Robustez	0	100
Tiempo de experimentación	60 min : 28	17min : 100
TOTAL	328	850

A continuación se procedió a realizar un análisis comparativo conociendo que 1000 puntos equivalen a 100%.

Para calcular el porcentaje en el prototipo inicial se ocupó la **(Ec. 6. 1)**, para calcular el porcentaje en el prototipo actual se utilizó la **(Ec. 6. 2)**, y para el porcentaje de mejora se restó el resultado de la **(Ec. 6. 2)** y **(Ec. 6. 1)**

$$\%mpi = \frac{328 * 100}{1000} = 32.8\% \quad \text{(Ec. 6. 1)}$$

$$\%mpa = \frac{850 * 100}{1000} = 85\% \quad \text{(Ec. 6. 2)}$$

$$\%m = 85 - 32.8$$

$$\%m = 52.2\%$$

Por lo tanto el porcentaje de mejora en diversos aspectos entre el prototipo inicial y el prototipo actual fue de 52.2%.

6.3.5 Análisis mecánico del dispositivo con carga de impacto

Se realizó un análisis de impacto respecto al soporte superior del prototipo, asumiendo que es arrojado a una altura de 0.2 m. Como parámetros se tiene que el peso del soporte superior igual a 0.5 Kg, el material es acrílico con las siguientes propiedades: Coeficiente de elasticidad: $E=334 \times 10^6$ [Pa], Esfuerzo flector: $\sigma_M=10.7 \times 10^6$ [Pa], Área: 0.2×0.003 [m].

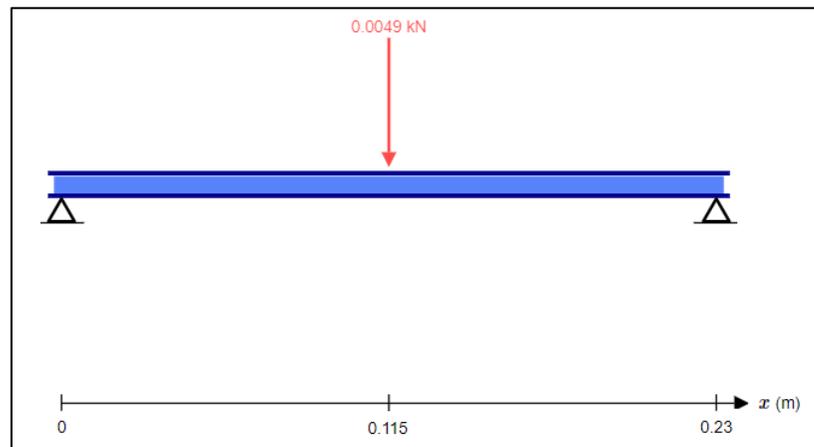


Figura 59 Diagrama de fuerzas para el cálculo del impacto

- Calcularemos la inercia de la parte superior del soporte para el análisis

$$I = \frac{bxh^3}{12}, \text{ donde } b: \text{ base, } h: \text{ altura}$$

$$I = 4.5 \times 10^{-10} \text{ [m}^4\text{]}$$

- Calculo el Coeficiente de elasticidad.

$$k = \frac{48 * E * I}{L^3}$$

donde E : coeficiente de elasticidad, I es inercia del elemento

$$k = \frac{48 * 334 \times 10^6 \frac{N}{m} * 4.5 \times 10^{-10} m^4}{0.23^3 m^3}$$

$$k = 592 \left[\frac{N}{m} \right]$$

- Calculo de deformación estática

$$dest = \frac{W}{k}$$

donde W : peso del elemento, k : coeficiente de elasticidad

$$dest = \frac{4.9 N}{592 \frac{N}{m}}$$

$$dest = 0.0082 [m]$$

- Calculo de desplazamiento total

$$di = dest * \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 * h}{dest}} \right)$$

$$di = 0.0082 * \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 * 0.2}{0.0082}} \right)$$

$$di = 0.066 [m]$$

- Calculo de la fuerza al momento del impacto

$$Fi = di * k$$

$$Fi = 0.066 * 592$$

$$F_i = 39 \text{ [N]}$$

- Cálculo de esfuerzo Flector

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

$$\sigma_c = \frac{\frac{39 * 0.23}{4} * 0.0015}{4.5 \times 10^{-10}}$$

$$\sigma_c = 7.4 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_M = 10.7 \times 10^6$$

$$\sigma_c < \sigma_M$$

El prototipo tiene la capacidad de resistir a una caída de 0.2 [m] debido a que el esfuerzo flector calculado es menor a la resistencia en el límite elástico del acrílico.

6.4 Costos

A continuación en la **Tabla 40** se muestra los costos de la cámara de sensores y del circuito de potencia para la parte de control de temperatura, en la tabla se detalla la cantidad de cada elemento, el costo unitario y el costo total de los componentes.

Tabla 40**Costos por partes del sistema E-NOSE (1 de 3)**

CÁMARA DE SENSORES			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO U. (\$)	COSTO TOT. (\$)
Tarjeta ARDUINO UNO Atmega 328	1	15	15
Módulo 4 relés	1	6.58	6.58
Sensor DTH 11	1	5	5
Adaptador 120V 2A	1	7.5	7.5
Caja acero inoxidable	1	8	8
Ventilador cámara de sensores	1	2	2
TOTAL1			44.08
CIRCUITO DE POTENCIA			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO U. (\$)	COSTO TOT. (\$)
PCB Circuito de Potencia	1	2	2
Borneras	2	0.5	1
Resistencias 1/2 watt	4	0.03	0.12
Triac BT136	1	1.25	1.25
Capacitor 10uF a 250V	1	0.5	0.5
MOC 3041 6-pines	1	1.5	1.5
Resistencias de potencia 10 Watts 1kΩ	2	0.5	1
Sujetadores resistencias	2	1	2
TOTAL2			9.37

La **Tabla 41** es la continuación de costos que se inició en la **Tabla 40**, en ella se muestran los costos de la caja de conexiones, la cual permite alimentar todo el sistema a 110 V, el costo de la parte neumática que incluye todos los elementos para la respiración del dispositivo, también se detallan las partes de dopaje automático, que incluyen el sistema externo para agregar dopante a la muestra y por último el costo de la placa de integración de los sistemas.

Tabla 41
Costos por partes del sistema E-NOSE (2 de 3)

CAJA DE CONEXIONES			
ELEMENTO	CANT.	COSTO U. (\$)	COSTO TOT. (\$)
Interruptor encendido	1	2	2
Conector enchufe macho 110 V	1	0.4	0.4
Adaptador 2 tomacorrientes	1	3.8	3.8
Caja impresión 3D	1	35	35
TOTAL3			41.2
PARTE NEUTMÁTICA			
ELEMENTO	CANT.	COSTO U. (\$)	COSTO TOT. (\$)
1 Compresor BOYU Pump SE-314 3 L/min	1	15	15
Electroválvula 2/2 Clippard 10mm E210A-1C012	3	36.34	109.02
Unión de acero inoxidable en T	1	2.7	2.7
Uniones conectores acero inoxidable	12	0.65	7.8
Manguera 4 mm/1metro	2	2.5	5
TOTAL4			139.52
DOPAJE AUTOMÁTICO			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO U. (\$)	COSTO TOT. (\$)
Contenedor principal de alcohol	1	4	4
Soporte bomba de dopaje automático	1	5	5
Bomba para dopaje automático	1	8	8
TOTAL5			17
PCB DE CONEXIONES			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO U. (\$)	COSTO TOT. (\$)
PCB tamaño INEN	1	4	4
Borneras	9	0.5	4.5
Funda ácido	1	1.25	1.25
TOTAL 6			9.75

La **Tabla 42** muestra los gastos extras en la realización del prototipo, este apartado contiene elementos que no pertenecen a ningún subsistema, sin embargo son necesarios en la integración del sistema.

Tabla 42
Costos por partes del sistema E-NOSE (3 de 3)

EXTRAS			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO U. (\$)	COSTO TOT. (\$)
Pernos con tuerca M4	30	0.1	3
Arandelas M4	30	0.04	1.2
Amarras plásticas (funda)	1	0.8	0.8
Taype	1	1.3	1.3
Contenedores de prueba	4	1.5	6
Tubos de ensayo primeras pruebas	2	0.3	0.6
Alcohol comercial frasco	1	3.25	3.25
Estaño	1	0.75	0.75
Soporte en acrílico	1	28	28
Procesos de manufactura	1	200	200
Placa con sensores de gas	1	100	100
Columnas de soporte en bronce	4	8	32
Cables	50	0.1	5
TOTAL 7			381.9

La **Tabla 43** muestra un resumen de los costos de las partes del prototipo E-NOSE, en ella se calcula el valor total del prototipo, donde se observa que dicho monto es relativamente bajo, cabe recalcar que en ningún análisis está incluido el costo de ingeniería de la elaboración del dispositivo, los costos mostrados son únicamente de los materiales.

Tabla 43
Total de costos E-NOSE

SUBTOTAL	REFERENCIA	VALOR
Cámara de sensores	<i>Tabla 40</i>	44.08
Circuito de potencia	<i>Tabla 40</i>	9.37
Caja de conexiones	<i>Tabla 41</i>	41.2
Parte neumática	<i>Tabla 41</i>	139.52
Dopaje automático	<i>Tabla 41</i>	17
PCB conexiones	<i>Tabla 41</i>	9.75
Extras	<i>Tabla 42</i>	381.9
	TOTAL	642.82

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Se potenció y optimizó un dispositivo de nariz electrónica realizado previamente que detecta Trinitrotolueno (TNT) de uso militar, obteniendo resultados positivos donde el prototipo actual mejoró en un 52.2% referente al prototipo inicial, aplicando conocimientos tales como mecánica de fluidos, transferencia convectiva de masa, estudio de ciencia de materiales y sistemas de control.
- Se analizó y determinó el material óptimo para la cámara de sensores obteniendo como resultado el acero inoxidable, que al ser un material inodoro no modifica las mediciones de los sensores, y además se comparó la fiabilidad respecto a la cantidad de información que recibieron los sensores, esto del acero inoxidable (99%) en comparación con otros materiales como la madera (33.33) y el plástico PET (66.6%).
- Se implementó un sistema de control digital (Proporcional-Integral) para la temperatura en la cámara de sensores en el cual la referencia fue 29° C, de esta manera el dispositivo puede ser utilizado a cualquier hora del día y en cualquier lugar.
- Se desarrolló un sistema de dopaje que automatizó en un 100% la aplicación de dopante a la muestra, previamente a la excitación de los sensores; por lo cual la aplicación del dispositivo actual puede realizarse en un ambiente real, sin necesidad de modificar las muestras a analizar y lo convirtió en portable.
- Se desarrolló un sistema eficiente de respiración de la nariz electrónica con un análisis de mecánica de fluidos, reduciendo el tiempo de respiración de 60 minutos a 17 minutos y otorgando una mejora de 36% en el proceso de respiración completo, esto debido al aumento de caudal en el sistema.

- Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario que permite la adquisición de datos para su posterior análisis, en ella se puede visualizar el estado del prototipo y realizar un dopaje semiautomático.
- El prototipo desarrollado presentó diferentes respuesta gráficas al someterlo a 3 sustancias diferentes y comunes: jabón, manzana y harina; es decir visualmente se observó que la respuesta del prototipo es diferente en función de la muestra a analizar.

7.2 Recomendaciones

- Para aumentar la portabilidad del dispositivo nariz electrónica desarrollado en este proyecto se puede modificar el análisis de datos para que este no requiera de un computador como parte del sistema, sino que más bien se realice un sistema embebido en el mismo dispositivo que realice el procesamiento de la señal.
- Para la realización del modelo de discriminación entre TNT con dopaje automático y otras sustancias se puede realizar un análisis con técnicas de estadística avanzada de tal manera que este sea más robusto, debido a que en el proyecto actual se realizó un análisis basado en estadística básica.
- Para reducir el tiempo de limpieza e inyección de muestra a la cámara de sensores se debe realizar una modificación en dicha cámara donde consten diversos medios de escape de aire contaminado, pero que a su vez exista un mecanismo que proporcione hermeticidad al momento de la toma de muestras.
- Si la potencia de la bomba toma un valor mayor se puede optimizar el proceso de respiración de la nariz electrónica, sin embargo es necesario realizar un estudio de la influencia de las electroválvulas en la pérdida de potencia, caudal y presión en todo el sistema.

REFERENCIAS

- Alisson, E. (17 de Abril de 2014). <http://agencia.fapesp.br>. Recuperado el 05 de Mayo de 2017, de http://agencia.fapesp.br/cientificos_desarrollan_sensores_de_papel_para_detectar_explosivos/18933/
- Almeida, A. (Nov. 1994). Neural Network in oven prevents overcooking. *The institute*, 3.
- Arshak, K., Moore, E., Lyons, G., Harris, J., & Clifford, S. (2006). A review of gas sensors employed in electronic nose applications. *KUDOS*. Recuperado el 18 de Julio de 2017
- Blanco, F. (Junio de 2004). *Selección de Materiales*. Recuperado el 10 de Mayo de 2017, de <http://www6.uniovi.es>: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema8.SeleccionMateriales.Introduccion.pdf>
- Boyuaquarium. (Mayo de 2014). <http://www.boyuaquarium.com>. Recuperado el 25 de Julio de 2017, de http://www.boyuaquarium.com/en_ArticleShow.asp?ArticleID=1431
- Brezmes, J. (2002). Diseño de sistemas de olfato electrónico. Barcelona. Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/94188/CAPITOL3.pdf>
- Busto, O. (2011). La nariz electrónica: una nueva herramienta para analizar el aroma. *Revista de Enología ACE*.
- Callister, W. (2003). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Madrid: Jr., Editorial Reverté, S.A.
- Camacho, F., & Martinez, L. (2002). Determinacion de difusividad de vapores de aire. *Anales de Quimica*, 117.

- çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y aplicaciones*. México DF.: McGraw-Hill Interamericana.
- Criado, M. Á. (06 de Febrero de 2005). Una nariz electrónica para el vino. *el mundo*, pág. 8. Recuperado el 05 de Junio de 2017, de <http://www.elmundo.es/ariadna/2005/220/1107532345.html>
- Departamento de Control de Armas de las FFAA. (2015). *Departo de Control de Armas*. Obtenido de <http://controlarmas.ccffaa.mil.ec>
- Diaz, J. (2006). Vulcanología: invento de una nariz electrónica caáz de oler gases. San José, Costa Rica.
- E-Nose, G. (17 de Marzo de 2014). <http://www.narizelectronica.com.ar>. Obtenido de <http://www.narizelectronica.com.ar/paginas/general.htm>
- Food Engineering. (1994). "Going the nose one better". *Food Engineering*.
- Gardner J. W., W. H. (2000). An electronic nose system for monitoring the quality of portable water . *Sensors and Actuators B: Chemical* , VOlume 69, 336-341.
- Gomez, M., & Alegret, S. (1997). Los sensores químicos: Una aportacion a la instrumentación analítica. *Como se analiza*.
- González, H. Á., & Mesa, H. D. (2004). La importancia del método en la selección de materiales. *Scientia et Technica*, 175-180. Recuperado el 10 de Mayo de 2017, de <http://www.redalyc.org/html/849/84912053029/>
- Graham Bell, A. (1919).
- Granados, A. (2016). *Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de zinc obtenidas por el método de precipitación para su aplicación en pintura esmalte comercial*.

<http://www.cetronic.es>. (05 de Mayo de 2017). <http://www.cetronic.es>. Obtenido de <http://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/Catalogo.jsp?idIdioma=&idTienda=93&cPath=927>

J.Lozano, J.P.Santos, M.Aleixandre, I.Sayago, M.García, A.Martínez, & M.Cabellos*. (2013). Sistema de nariz electrónica para el análisis de la evolución del vino controlada por PC. *Dept. Arquitectura de Computadores y Automática. Fac. Físicas. Universidad Complutense de Madrid*. Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de https://www.researchgate.net/profile/Jesus_Lozano2/publication/267822022_SISTEMA_DE_NARIZ_ELECTRONICA_PARA_EL_ANALISIS_DE_LA_EVOLUCION_DEL_VINO_CONTROLADA_POR_PC/links/546df85d0cf29806ec2e6403.pdf

J.W: Gardner, E. H. (1990). Application of artificial Neural Networks to an Electronic Olfactory System. *Measurement Science and Technology*, vol 1.

Krishna C. Persaud, H. C. (1991). Odour detection using sensor arrays.

Llamas, L. (23 de Septiembre de 2014). www.luisllamas.es. Recuperado el 21 de Junio de 2017, de <https://www.luisllamas.es/entradas-analogicas-en-arduino/>

López Hernández, P. (2016). *Desarrollo de un prototipo electrónico de sensado químico, para la detección de trinitrotolueno (TNT) y pólvora base doble en un ambiente controlado*. Sangolquí.

Luzuriaga, D. A., & Balaban, M. (1997). La "Nariz electrónica": un Nuevo Sistema Para el Control de Calidad de Mariscos. *M. Comercio*. Recuperado el 05 de Mayo de 2017

Mamat, M., & Abdul Samad, S. (17 de Marzo de 2011). The design and testing of an Electronic Nose prototype for classification problem. (IEEE, Ed.) *Computer*

Applications and Industrial Electronics (ICCAIE), 2010 International Conference on. Recuperado el 05 de Mayo de 2017, de <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5735108/>

Mannino, S. (2006). *Electronic Nose and Neuronal network use for the classification honey.* Apidology 35 INRA/DIB-AGIB/EDP Sciences .

Mannino, S. (2006). *Electronic Nose and Neuronal network use for the classification honey.*

Martí, P. (2004). *Electronic noses in the quality control of alcoholic beverages. Inglaterra.*

Merino, R. B. (2013). *Síntesis dirigida a la mejora de las propiedades del (K,Na)NbO₃.* Barcelona. Recuperado el 08 de Mayo de 2017, de http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/65432/1/TFM_QMA_RBeato.pdf

Micolita, E. (2013). *Circuito de disparo en potencia.* Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

Ministerio de Coordinación de Seguridad. (2013). *plan Nacional de Seguridad Integral.* Quito, Pichincha, Ecuador.

Moreno, I., & Caballero, R. (2009). *La Nariz Electrónica: Estado del Arte. Revista Iberoamericana de automática e Informática Industrial, 5.*

Moreno, I., & Serracín, J. (2016). *Matriz de sensores: Fundamentos de la nariz electrónica. 1er Congreso Internacional sobre soluciones en Inteligencia Ambiental, Ingeniería de software y Salud Electrónica Móvil, 37-39.*

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos aplicada.* México: Prentice Hall.

Nuñez, F. (2007). *Control de movimiento empleando Labview, un enfoque didáctico.* Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Computación, Electrónica

y Mecatrónica, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Puebla. Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/nunez_e_f/capitulo1.pdf

Palacios, V. (23 de Mayo de 2007). *Sensación y Percepción*. Obtenido de <http://sensacionypercepcion.blogspot.com/2007/05/olfato.html>

Paul E. Keller, L. J. (1995). Electronic Noses and their applications. *Northcon/Technical Applications Conference (TAC'95)* (págs. 1-6). Portland: IEEE.

Pequeño, A. (2015). *Uso de una nariz electrónica ultra-portátil en robots para la detección de fuentes odorantes*. Universidad Autónoma de Madrid, Ingeniería de Telecomunicación, Madrid. Recuperado el 18 de Julio de 2017

Quicazán, M. C., Díaz, A. C., & Zuluaga, C. M. (2011). La nariz electrónica, una novedosa herramienta para el control de procesos y calidad en la industria agroalimentaria. *vitae, revista de la facultad de química farmacéutica*, 18(2), 209-217. Recuperado el 08 de Mayo de 2017, de <http://www.scielo.org.co/pdf/vitae/v18n2/v18n2a12.pdf>

Rodríguez Gamboa, J. C., & Durán Acevedo, C. (2008). Electronic odor system to detect volatile compounds. *Colombiana de Tecnologías avanzada*, 20-26.

Rodríguez Méndez, M. L. (2001). Análisis sensorial de alimentos. Nariz electrónica. *Dpto. Química Inorgánica E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid*.

Sanjuan, J. V. (2008). *Control Digital*. Universidad Tecnológica de Mixteca, Ingeniería Electrónica.

Sistemas-Automáticos. (2007). *Introducción al control Digital*. Universidad de Oviedo, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Oviedo.

- Staymates, M., MacCrehan, W., Staymates, J., Kunz , R., Mendum, T., Ong, . . . Craven, B. (2016). Biomimetic Sniffing Improves the Detection Performance of a 3D Printed Nose of a Dog and Commercial Trace Vapor Detector. *Scientific Reports*, 1-10.
- Szkudlarz. (2008). The potential of different techniques for volatile compounds analysis coupled with PCA for the detection of adulteration of olive with hazelnut oil. *ScienceDirect. Food Chemistry*, Volume 110, 751-761.
- T. Moriizumi, T. N. (1992). Pattern Recognition in Electronic Noses by. *Sensors and Sensory Systems for an Electronic Nose.*, 217-236.
- Wang, C., & Yin, L. (2010). Sensores de gas de óxido metálico: Factores de sensibilidad e influencia. *Sensors*.
- Welty, J. R. (1994). *Fundamentos de transferencia, momento, calor y masa*. Mexico: Limusa.
- Wilkins, W. F., & HARTMAN, J. D. (Mayo de 1964). An Electronic Analog for the Olfactory Processes. *Journal of Food Science*, 372–378. Recuperado el 05 de Mayo de 2017, de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.1964.tb01746.x/abstract>
- Zhang H., W. J. (2008). Predictions of acidity, soluble solids and firmness of pear using electronic nose technique. *ScienceDirect, Journal of food Engineering.*, Volumen 86, 370-378.

ANEXOS