



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: “REPOTENCIACIÓN DE LA NARIZ ELECTRÓNICA CON
DOPAJE AUTOMÁTICO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2016-
PIC-009”**

AUTOR: JÁCOME DURÁN, FRANCISCO SEBASTIÁN

DIRECTORA: Ph.D. GUAMÁN NOVILLO, ANA VERÓNICA

SANGOLQUÍ

2020



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“REPOTENCIACIÓN DE LA NARIZ ELECTRÓNICA CON DOPAJE AUTOMÁTICO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2016-PIC-009”*** fue realizado por el señor *Jácome Durán Francisco Sebastián* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizando por la herramienta de verificación de similitud de contenido por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 7 de enero del 2020

Firma:

Ph.D. GUAMÁN NOVILLO ANA VERÓNICA

C. C.: 1103996946



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Jácome Durán Francisco Sebastián*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *"REPOTENCIACIÓN DE LA NARIZ ELECTRÓNICA CON DOPAJE AUTOMÁTICO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2016-PIC-009"* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 7 de enero del 2020

Firma:

JÁCOME DURÁN FRANCISCO SEBASTIÁN

C.C.: 1719292375



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN

Yo, *Jácome Durán Francisco Sebastián*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “*REPOTENCIACIÓN DE LA NARIZ ELECTRÓNICA CON DOPAJE AUTOMÁTICO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2016-PIC-009*” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad

Sangolquí, 7 de enero del 2020

Firma:

.....
JÁCOME DURÁN FRANCISCO SEBASTIÁN

C.C.: 1719292375

DEDICATORIA

Quiero dedicar el presente trabajo a mis lindos padres ya que sin ellos no habría podido seguir adelante. A ellos les dedico porque en un momento de mi carrera universitaria estuve a punto de tirar la toalla y darme por vencido; así que todos mis logros se lo debo a ellos por colocar su confianza y amor en mí, lo cual estaré agradecido toda mi vida.

AGRADECIMIENTO

A mi querida madre le quiero agradecer por todo el apoyo que me supo dar en el transcurso de mi carrera ya que ella vivió conmigo las malas noches o de verme alguna vez derramar una lágrima, pero gracias a su apoyo todo fue más sencillo.

A mi querido padre le agradezco por siempre confiar en mí y de no darse por vencido ya que se el esfuerzo que pone día a día para darnos una educación a sus hijos y espero llegar a ser tan buena persona como él.

A mis hermanos que siempre han estado ahí apoyándome en las buenas y en las malas.

A mi tía Ximena por ser una segunda mamá en mi vida.

A Ana que siempre estuvo a mi lado en los días más difíciles como en los momentos más felices de mi vida.

A todos mis amigos y amigas, ya que fueron un apoyo incondicional de seguir adelante y de no darnos por vencido.

A todos los docentes que formaron parte de mi educación y especialmente a mi directora de trabajo de titulación Ing. Ana Guamán la cual fue una gran mentora en todo este proceso.

CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
 CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación e Importancia	2
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo General.....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Descripción de proyecto	11

1.5 Estructura del documento	14
------------------------------------	----

CAPÍTULO II

SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL.....	16
--	-----------

2.1 Sistema neumático.	16
-----------------------------	----

2.1.1 Medición de flujo volumétrico de la nariz electrónica	19
---	----

2.1.1.1 Leyes físicas que describen el flujo de una nariz electrónica.	22
---	----

2.1.1.2 Diseño y desarrollo del flujómetro de la nariz electrónica.	25
--	----

2.1.1.3 Calibración y medición de flujo de la nariz electrónica.	34
---	----

2.2 Cámara de sensores.....	38
-----------------------------	----

2.2.1 Calibración de los sensores de la nariz electrónica.....	45
--	----

2.3 Sistema de control de temperatura.....	49
--	----

2.3.1 Selección del sensor.....	51
---------------------------------	----

2.3.2 Identificación del modelo matemático de la planta	53
---	----

2.3.3 Sintonización de los parámetros del control PID.....	58
--	----

2.3.4 Pruebas de simulación del sistema de control de temperatura.....	61
--	----

2.3.5 Resultados del sistema de control de temperatura	64
--	----

2.4 Dopaje automático.	68
-----------------------------	----

2.4.1 Control de lazo abierto.....	72
------------------------------------	----

CAPÍTULO III**INTERFAZ GRÁFICA Y MODELO DEL SISTEMA..... 75**

3.1 Interfaz gráfica 75

3.1.1 Diseño de la interfaz de usuario 76

3.1.2 Diagramas de programación de la nariz electrónica 83

3.1.3 Programación en bloques 86

3.2 Integración del Modelo de Clasificación PLS 87

CAPÍTULO IV**RESULTADOS 91**

4.1 Mejoras en el dispositivo 91

4.2 Uso del dispositivo..... 92

4.3 Discriminación de sustancias explosivas de no explosivas 93

CAPÍTULO V**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 97**

5.1 Conclusiones 97

5.2 Recomendaciones 98

REFERENCIAS..... 100**ANEXOS..... 103**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características técnicas, de sensores que conforma la matriz de sensores	5
Tabla 2 Valor del flujo volumétrico real a la cámara de sensores del prototipo anterior	17
Tabla 3 Clasificación del flujo de acuerdo al número de Reynolds.....	24
Tabla 4 Características del sensor MPX10DP	27
Tabla 5 Valores físicos de la ecuación de Poiseuille	35
Tabla 6 Standard Test Condition	41
Tabla 7 Potencia consumida de los sensores	46
Tabla 8 Características técnicas, de sensores que conforma la matriz de sensores	48
Tabla 9 Parámetros para la selección del sensor de temperatura.....	51
Tabla 10 Parámetros del controlador	61
Tabla 11 Parámetros del experimento a entrada escalón	64
Tabla 12 Parámetros del experimento a entrada rampa	65
Tabla 13 Parámetros principales de la bomba	69
Tabla 14 Datos experimentales del consumo de alcohol	73
Tabla 15 Tiempos de respiración en el dispositivo.....	91
Tabla 16 Comparación del prototipo antiguo con el actual	92
Tabla 17 Análisis de sustancias explosivas.....	94

Tabla 18 Porcentaje de error del análisis cuantitativo 95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bloques del proyecto de titulación de la nariz electrónica.....	3
Figura 2. Dispositivo E-NOSE para la detección de TNT y/o pólvora	4
Figura 3. Matriz de sensores Fuente: (López, 2016)	5
Figura 4. Esquema de distribución de resistencia de potencia para el control de temperatura Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)	7
Figura 5. Esquema neumático de respiración	8
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de respiración del prototipo E-NOSE Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)	8
Figura 7. Interfaz gráfica E-NOSE de adquisición de datos Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017) ...	9
Figura 8. Diagrama de bloques de la nariz electrónica.....	11
Figura 9. Esquema de dopaje automático del prototipo E-NOSE Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)	13
Figura 10. Esquema neumático de respiración de la nariz electrónica Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)	17
Figura 11. Flujo de entrada, paso 1, paso 2 y salida.....	19
Figura 12. Flujómetros por medición de presión diferencial Fuente: (Khazan, 1994).....	20
Figura 13. Diagrama de bloques del sistema para la medición de flujo	21
Figura 14. Neumotacógrafo o neumotacómetro	22

<i>Figura 15.</i> Neumotacógrafo con resistencia mecánica	26
<i>Figura 16.</i> Sensor de presión diferencial MPX10DP.....	26
<i>Figura 17.</i> Diagrama esquemático del circuito de instrumentación.....	27
<i>Figura 18.</i> Curva característica Presión Diferencial – Voltaje para el sensor MPX10DP Fuente:(Motorola, 2008).....	28
<i>Figura 19.</i> Etapa de preamplificación	29
<i>Figura 20.</i> Filtro activo pasa bajos a 10 Hz	30
<i>Figura 21.</i> Respuesta en magnitud y fase del filtro pasa bajos	30
<i>Figura 22.</i> Etapa de supresión de offset.....	31
<i>Figura 23.</i> Etapa de amplificación	32
<i>Figura 24.</i> Etapa de adición de offset	33
<i>Figura 25.</i> Rectificador de media onda.....	34
<i>Figura 26.</i> Relación de flujo de referencia vs el flujo medido por medio del principio del neumotacómetro.....	36
<i>Figura 27.</i> Flujo de absorción de la nariz electrónica.....	37
<i>Figura 28.</i> Flujo de absorción de la nariz electrónica después de la modificación.....	38
<i>Figura 29.</i> Placa PCB operativa.....	40
<i>Figura 30.</i> Caja hermética de la nariz electrónica.....	41

Figura 31. Conexiones eléctricas de los sensores TGS-(825, 826, 822, 2610) Fuente: (Figaro Engineering Inc, 2004) (Figaro Engineering Inc, 2014).....	42
Figura 32. Recipiente de pruebas.....	43
Figura 33. Pruebas realizadas a los sensores de la nariz electrónica	44
Figura 34. Muestra de sensores TGS826 defectuosos y cambiados	45
Figura 35. Diagrama de bloques que muestra los elementos de un ciclo de control de proceso Fuente:(Ltd., n.d.)	50
Figura 36. Control PID de una planta Fuente: (Ogata, 2013).....	51
Figura 37. Ubicación de los sensores de temperatura.....	53
Figura 38. Respuesta de la planta a una entrada escalón	54
Figura 39. Importación de datos del experimento	54
Figura 40. Importación de datos de los datos almacenados del experimento.....	55
Figura 41. Sistema de identificación.....	55
Figura 42. Identificación de la planta por medio del dominio del tiempo.....	56
Figura 43. Función de transferencia	56
Figura 44. Valores de polos y zeros.....	57
Figura 45. Estimación de parámetros de la planta.....	57
Figura 46. Herramienta de MatLab para sintonización de la planta.....	58
Figura 47. Herramienta pidtool.....	59

Figura 48 Sintonización PID para el controlador	60
Figura 49. Exportación de valores del controlador PID	60
Figura 50. Simulación de la planta de la nariz electrónica sin etapa de control.	61
Figura 51. Respuesta del sistema en lazo cerrado sin etapa de control	62
Figura 52. Simulación del sistema de control de temperatura de la nariz electrónica.....	62
Figura 53. Sistema de control a una entrada escalón.....	63
Figura 54. Sistema de control a una entrada rampa.....	64
Figura 55. Sistemas de control en tiempo real.....	65
Figura 56. Sistema de control en tiempo ante una entrada rampa	66
Figura 57. Oxidación de la bomba.....	69
Figura 58. Bomba de alcohol.....	70
Figura 59. Colocación de una aguja a la salida del flujo de alcohol.....	71
Figura 60. Réplicas en el llenado del contenedor de alcohol.....	72
Figura 61. Diagrama de flujo del proceso de dopaje automático	74
Figura 62. Ejemplo de distribución de objetos dentro de la pantalla para el indicador de distribución Fuente: (Harris, 2007).....	76
Figura 63. Interfaz grafica	77
Figura 64. Botones de ayuda para el usuario	77

<i>Figura 65.</i> Configuración de la tarjeta a utilizar	78
<i>Figura 66.</i> Identificación de la pantalla utilizada.....	78
<i>Figura 67.</i> Panel control.....	79
<i>Figura 68.</i> Panel de navegación	79
<i>Figura 69.</i> Pantalla de flujo de respiración	80
<i>Figura 70.</i> Pantalla de visualización de señales de la cámara de olores	81
<i>Figura 71.</i> Pantalla de sistema de control de temperatura	82
<i>Figura 72.</i> Pantalla de análisis de sustancias	82
<i>Figura 73.</i> Diagrama de flujo de la nariz electrónica.....	84
<i>Figura 74.</i> Subprocesos de la nariz electrónica.....	85
<i>Figura 75.</i> Vi de control de temperatura	86
<i>Figura 76.</i> Vi de MathScript	87
<i>Figura 77.</i> Captación de las señales, suavizado de las señales y eliminación de la línea base...	89
<i>Figura 78.</i> Concatenación de las señales filtradas	89

RESUMEN

Las narices electrónicas han sido diseñadas y construidas para emular el sentido del olfato con el afán de detectar y clasificar olores complejos. Varios trabajos de investigación en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE se han enfocado en la detección de explosivos, usando esta tecnología de narices electrónicas para detectar componentes característicos de los explosivos. El trabajo presente se enfoca en la repotenciación de la nariz electrónica con dopaje automático del proyecto de investigación 2016-PIC-009 ya que actualmente presenta diversos problemas como: el sensado químico de sustancias explosivas del dispositivo, el flujo de aire que llega a la cámara de sensores, el sistema de control de temperatura y un inexistente control de dopante de alcohol cuando se analiza varias sustancias por un tiempo prolongado. El proyecto actual propone en otorgar una solución a los diversos problemas presentes en el prototipo actual, además con el desarrollo de una nueva interfaz gráfica amigable al usuario y de la implementación de un modelo matemático para la discriminación de sustancias explosivas en tiempo real. Con las optimizaciones realizadas a la nariz electrónica tanto en hardware como software se puede decir que finalmente se tiene una nariz más completa al implementarse un modelo clasificador obteniendo un resultado de discriminación de sustancias explosivas del 86.66%.

PALABRAS CLAVE:

- **NARIZ ELECTRÓNICA**
- **REPOTENCIACIÓN**
- **DISCRIMINACIÓN**
- **EXPLOSIVOS**
- **INTERFAZ GRÁFICA.**

ABSTRACT

Electronic noses have been designed and constructed to emulate the sense of smell in an effort to detect and classify complex odors. Several research papers at the University of the Armed Forces - ESPE have focused on the detection of explosives, using this technology of electronic noses to detect characteristic components of explosives. The present work focuses on the repowering of the electronic nose with automatic doping of the research project 2016-PIC-009 as it currently presents several problems such as: the chemical sensing of explosive substances of the device, the air flow that reaches the chamber of sensors, the temperature control system and a non-existent alcohol dopant control when several substances are analyzed for a long time. The current project proposes to provide a solution to the various problems present in the current prototype, in addition to the development of a new user-friendly graphic interface and the implementation of a mathematical model for the discrimination of explosive substances in real time. With the optimizations made to the electronic nose in both hardware and software, it can be said that finally there is a more complete nose when a classification model is implemented, obtaining a result of discrimination of explosive substances of 86.66%.

KEYWORDS:

- **ELECTRONIC NOSE**
- **REPOTENTIATION**
- **DISCRIMINATION**
- **EXPLOSIVES**
- **GRAFIC INTERFACE.**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las narices electrónicas han sido diseñadas y construidas para emular el sentido del olfato con el afán de detectar y clasificar olores complejos. Hoy en día, el uso de narices electrónicas permite detectar diferentes tipos de compuestos químicos que el ser humano es incapaz de identificar.

Los orígenes de la nariz electrónica data de los años 60, cuando la compañía Bacharach Inc., pioneros en el análisis de combustión, desarrollan los primeros detectores portátiles de gas para la industria minera llamada “Canario”, el cual no se consideró como una nariz electrónica (“Bacharach: Pioneers in Combustion Analysis,” n.d.). En el año 1964 Wilkens y Hatman dan las primeras investigaciones de la nariz electrónica basada en las reacciones de redox entre las moléculas de odoríferas y un electrodo (Requena & Tomás, 2008).

En el año 1982 Persaud y Dood, utilizaron un conjunto de sensores semiconductores de óxidos metálicos, para la medición de una amplia variedad de productos químicos y mezclas transportadas por ferrocarriles, barcos y camiones (Persaud & Dodd, 1982).

A finales de los años 90 Gardner y Barlett surge el concepto de nariz electrónica como “Instrumento que comprende una agrupación de sensores químicos con sensibilidades parcialmente solapadas junto a un sistema de reconocimiento de patrones, capaz de analizar y reconocer aromas simples y complejos” (Gardner & Bartlett, 2000).

Varios trabajos de investigación en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE se han enfocado en la detección de explosivos, usando esta tecnología de narices electrónicas para detectar componentes característicos de los explosivos, asociados al proyecto de investigación 2016-PIC-009.

Dentro del repositorio de los trabajos de investigación de las Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE se han desarrollado proyectos de investigación acerca de las narices electrónicas. El prototipo realizado en 2016 por López, en su proyecto de titulación “Desarrollo de un prototipo electrónico de sensado químico, para la detección de trinitrotolueno (TNT) y pólvora base doble en un ambiente controlador” para aplicaciones militares. Dicho dispositivo contaba con una adquisición de datos y un análisis OFF-LINE (López, 2016).

En el proyecto de titulación de Vallejo y Zurita realizado en 2017 acerca del proyecto de investigación “Diseño e implementación de un sistema mecatrónico portable con dopaje automático para detección de muestras explosivas” se realiza los estudios y experimentos con mecánica de fluidos y transferencia convectiva de masa; al igual se desarrolla un sistemas de control de temperatura y el prototipo lleva un dopaje automático para no alterar la muestra a analizar, con este proyecto se mejoró su portabilidad y un mejor funcionamiento al prototipo realizado por López (Vallejo & Zurita, 2017).

1.2 Justificación e Importancia

Las Fuerzas Armadas y Policía Nacional adiestran a canes anti explosivos los cuales tienen la capacidad de detectar municiones, explosivos y/o elementos para elaborar estos artefactos. De

acuerdo a las Fuerzas Armadas las operaciones de control con estos tipos de canes entrenados son permanentes, para evitar cualquier tipo de atentado con la población civil, militares y policías.

Según estudios realizados por el Ministerios de Defensa y el Departamento de Control de Armas, el explosivo de mayor contrabando en el Ecuador es la pentolina, que está compuesta por un 50% de Trinitrolueno (TNT) y un 50% de pentrita (Lexis, 2009).

En el proyecto de investigación 2016-PIC-009 se enfoca en el análisis de fuentes explosivas, el cual se ha ido trabajando para el desarrollo de dichas narices electrónicas para tener una alta exactitud en la detección de explosivos.

Una de ellas fue el desarrollo del proyecto de investigación de Vallejo y Zurita “Diseño e implementación de un sistema mecatrónico portable con dopaje automático para detección de muestras explosivas” (Vallejo & Zurita, 2017), donde se pudo realizar la adquisición de datos de las variables de la cámara de sensores.

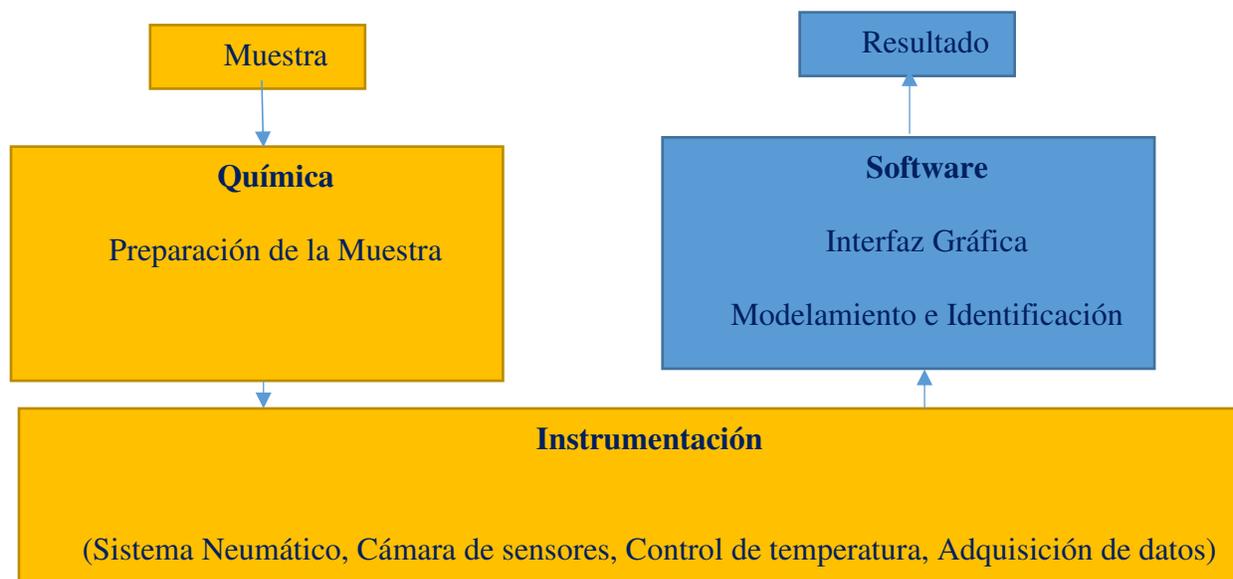


Figura 1. Bloques del proyecto de titulación de la nariz electrónica

Como se muestra en la Figura 1, el proyecto de titulación cuenta con tres bloques; donde cierta parte del proyecto de investigación 2016-PIC-009 ha sido implementada, como los bloques de preparación de la muestra y la instrumentación de la nariz electrónica, sin embargo, falta el bloque de modelamiento para la identificación de muestras y una interfaz gráfica que sea amigable al usuario.

A continuación, se detalla el estado actual del dispositivo realizado por Vallejo y Zurita:

- La cámara de sensores de la nariz electrónica es de acero inoxidable, cuenta con una matriz de sensores y un sistema de control de temperatura.

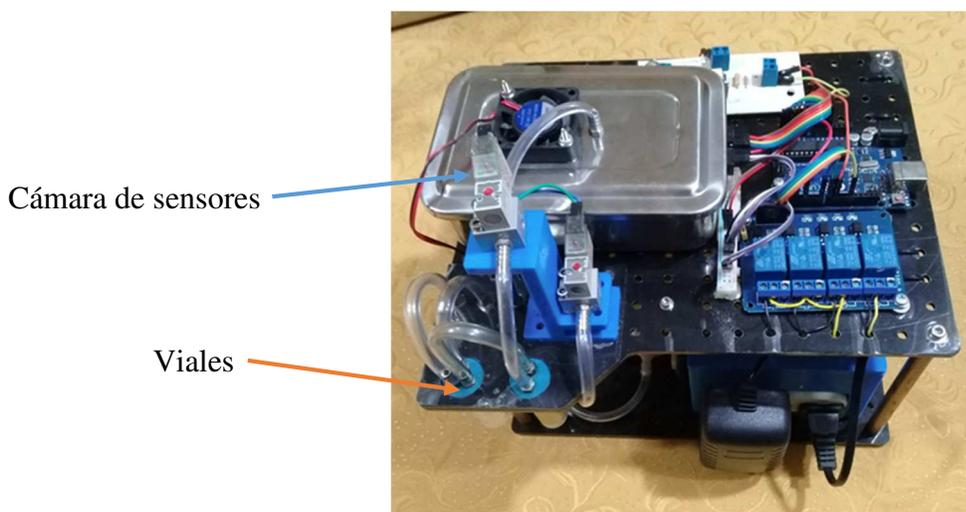


Figura 2. Dispositivo E-NOSE para la detección de TNT y/o pólvora

Como se observa en la Figura 3, la matriz de sensores está constituida de 6 sensores químicos con su respectivo divisor de tensión para la calibración de cada sensor. En la

Fuente: (López, 2016)

Tabla 1 se indica las características técnicas de los sensores químicos que conforma la nariz electrónica.



Figura 3. Matriz de sensores
Fuente: (López, 2016)

Tabla 1
Características técnicas, de sensores que conforma la matriz de sensores

Ord.	Modelo	Voltaje de Heather V_H	Voltaje de acondicionamiento V_C	Resistencia de carga R_L	Potencia de consumo P_x
1	TGS-825	$\pm 0.2 V$	$\leq 24V(AC/DC)$	$9.46 k\Omega$	$\leq 15mW$
2	TGS-822	$\pm 0.2 V$	$\leq 24V(AC/DC)$	$3.01 k\Omega$	$\leq 15mW$

		(AC/DC)			
		5V			
3	TGS- 826	$\pm 0.2 V$	$\leq 24V(AC/DC)$	7.65 k Ω	$\leq 15mW$
		(AC/DC)			
		5V			
4	TGS- 822	$\pm 0.2 V$	$\leq 24V(AC/DC)$	7.66 k Ω	$\leq 15mW$
		(AC/DC)			
		5V			
5	TGS- 826	$\pm 0.2 V$	$\leq 24V(AC/DC)$	10 k Ω	$\leq 15mW$
		(AC/DC)			
		5V			
6	TGS- 2610	$\pm 0.2 V$	$5V \pm 0.2(DC)$	6.76 k Ω	$\leq 15mW$
		(DC)			

Fuente: (López, 2016)

- El control de temperatura en la cámara de sensores es idóneo debido a que las mediciones no deben causar ningún tipo de cambio en las lecturas de cada sensor químico. El sistema cuenta con dos resistencias de potencia ubicados a los laterales de la caja inoxidable como se indica en la Figura 4, esto se realiza para garantizar la homogeneidad de calor en toda la cámara.

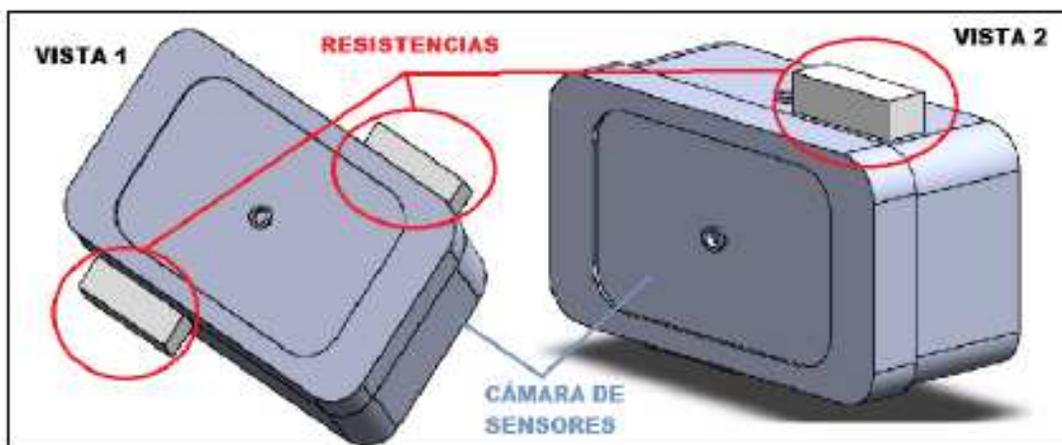


Figura 4. Esquema de distribución de resistencia de potencia para el control de temperatura
Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)

- El dispositivo E-NOSE cuenta con dos viales para colocar el alcohol y la sustancia de interés ya sea TNT y/o pólvora, como se observa en la Figura 2, en el proyecto de investigación realizado por Vallejo y Zurita los contenedores se colocaban 2g de TNT, y el otro contenedor con 2ml de alcohol.
- El esquema neumático del prototipo cuenta con 3 válvulas, 1 compresor de aire, 2 contenedores y tubería de 4mm de diámetro interior. El flujo volumétrico real en el sistema de respiración debe garantizar que el flujo de 1.1 lpm llegue a la cámara de sensores con la muestra a analizar.

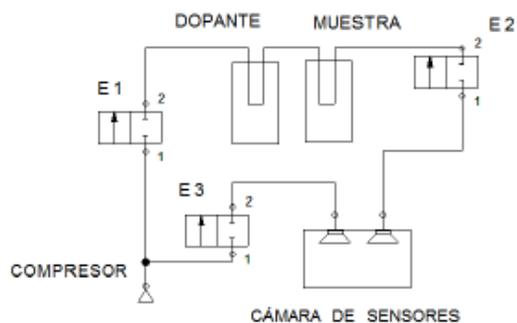


Figura 5. Esquema neumático de respiración

- En la Figura 6 se encuentra el flujo de respiración del dispositivo, este proceso cuenta con la aspiración y limpieza necesarias para la obtención de datos en la cámara de sensores a la sustancia a analizar.

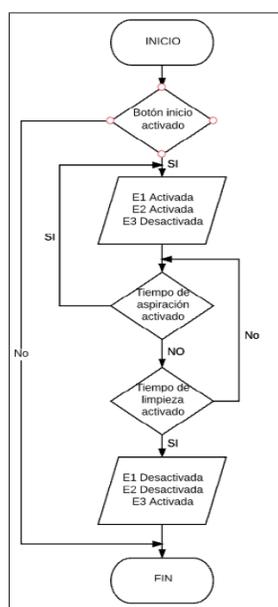


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de respiración del prototipo E-NOSE
Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)

En una revisión previa del dispositivo se realizó la revisión del prototipo como la estructura neumática, instrumentación, el sistema de control de temperatura y la interfaz gráfica. Consecuente

a esta revisión se encontraron problemas en el análisis de sustancias explosivas del dispositivo, esto puede ser producido a que algún sensor este defectuoso, el sistema de control de temperatura no es el adecuado o el flujo de respiración del prototipo este fallando.

Como se observa en la Figura 7 se encuentra la interfaz gráfica del prototipo E-NOSE con dopaje automático en la cual no se da mucha información del sistema ya que no resulta amigable al usuario, no se indica los resultados de la muestra como tal y la función de dopaje automático “DOPAR” no funciona.

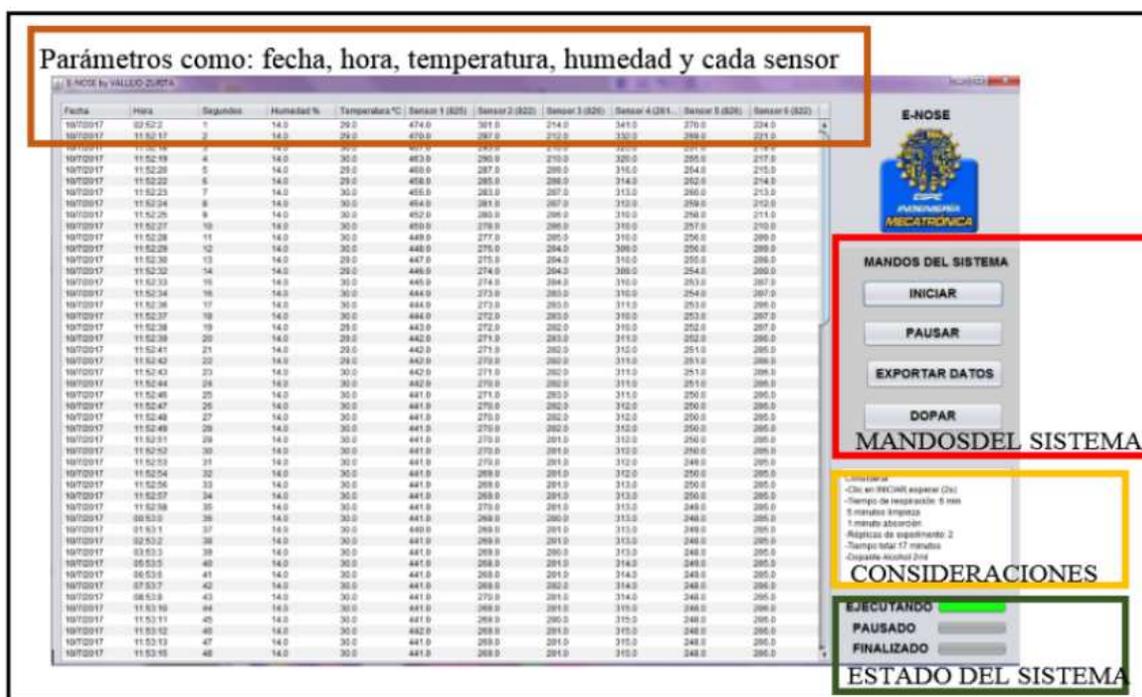


Figura 7. Interfaz gráfica E-NOSE de adquisición de datos

Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)

En el proyecto de investigación se propone realizar la repotenciación de todo el sistema, mejorando el control de temperatura, la mejora del dopaje automatizado de sustancias para la

detección de TNT y/o pólvora, revisión de los sensores de la cámara de sensores químicos, revisión neumática del sistema, mejoramiento de la interfaz gráfica y la identificación de muestras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Repotenciar la nariz electrónica con dopaje automática del proyecto de investigación 2016-PIC-009 para discriminar sustancias explosivas de no explosivas en tiempo real.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recalibrar el sistema de sensado de la cámara de sensores del prototipo.
- Comprobar el flujo que circula por el sistema neumático de la nariz electrónica con dopaje automático que cumple con las especificaciones de diseño.
- Rediseñar el sistema de control de temperatura para mejorar la respuesta en estado estacionario.
- Implementar un modelo de discriminación, desarrollado previamente, para que se ejecute en tiempo real.
- Diseñar e implementar una nueva interfaz gráfica amigable para el usuario, para el uso del sistema y la visualización de resultados.
- Comprobar el desempeño del dispositivo en términos de uso, tiempo de respuesta, y porcentaje de clasificación de sustancias explosivas.

1.4 Descripción de proyecto

El presente proyecto de titulación pretende apoyar al proyecto de investigación para la detección temprana de TNT y/o pólvora. En busca de este cometido se repotenciará el diseño e implementación del prototipo E-NOSE con dopaje automatizado.

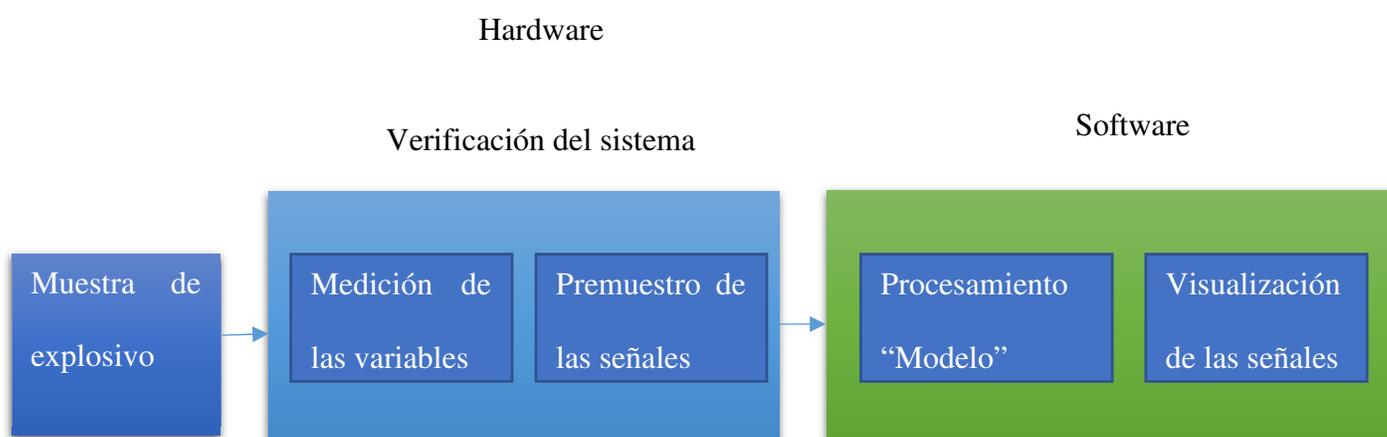


Figura 8. Diagrama de bloques de la nariz electrónica

En el bloque de Hardware:

- La cámara de sensores del prototipo actual cuenta con 6 sensores químicos y cada uno posee un sistema de acondicionamiento basado en un divisor de tensión. Luego de realizar una verificación rápida del prototipo, se observó que la respuesta de la cámara no es estable y ha sufrido una deriva, esto puede ser debido a que exista algún sensor dañado, y/o sea necesario realizar una recalibración del sistema. Por lo tanto, en el proyecto de titulación se realizará la verificación individual de cada uno de los sensores

y si fuese necesario el cambio de alguno de ellos y luego se efectuará la recalibración del sistema de sensado.

- El sistema neumático está constituido por una bomba y una serie de electroválvulas neumáticas. En la tesis de Vallejo y Zurita el flujo fue optimizado para garantizar la mayor captación de volátiles de la sustancia de interés ya sea TNT y/o pólvora. En este trabajo se revisará que se cumplan con los flujos de diseño y en caso de existir algún problema se realizará las mejoras necesarias.
- En la cámara de sensores existe un sistema de control de temperatura necesario para poder disminuir los efectos ambientales y que perjudican la sensibilidad de los sensores. Se realizará un rediseño del sistema de control de temperatura del prototipo para que el error en estado estacionario sea menor al 5% y se probara el desempeño para entradas rampas
- Uno de los problemas en el análisis de sustancias explosivas es la baja volatilidad de las sustancias en su estado real, sin embargo, se ha demostrado en trabajos anteriores (López, 2016) al mezclarla con alcohol y/o acetona se consigue volatilizar las sustancias de TNT y/o pólvora. Sin embargo, el mezclar la sustancia explosiva no se aproxima a un hecho real para lo cual se desarrolló un sistema de dopaje basado en el barrido por espacio de cabeza. En la Figura 9 se observa el sistema de dopaje, desarrollado en la tesis de Vallejo y Zurita, el cual consiste en dos viales donde se deposita un dopante que en este caso es alcohol y en el otro vial TNT y/o pólvora. Por lo que las moléculas de aire se mezclan con el espacio de cabeza generado por las moléculas del alcohol y esta mezcla a su vez interaccionan con los volátiles de la sustancia de interés. Uno de los

problemas de este sistema es que no existe un control del dopante cuando analiza varias sustancias por un tiempo prologando y por lo tanto se evapora, por lo tanto, en este trabajo de tesis se desarrolla un sistema de control que permita tener un control sobre la cantidad de dopante presente en el vial.

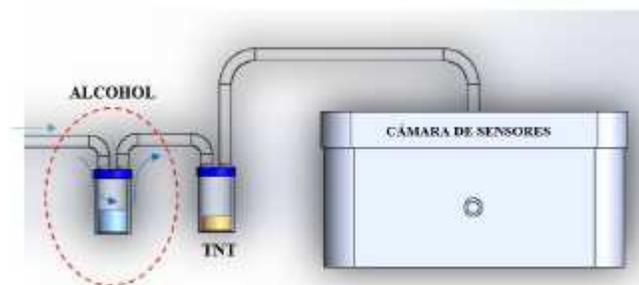


Figura 9. Esquema de dopaje automático del prototipo E-NOSE
Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)

En el bloque de software:

La interfaz gráfica actual realizada en JAVA no cuenta:

- Con un sistema amigable al usuario para el uso del prototipo.
- Un sistema de identificación de TNT y/o pólvora.
- Visualización de las gráficas de los sensores químicos en tiempo real.

En el presente proyecto de titulación se realizará la mejora de la interfaz gráfica para la facilidad del usuario en el manejo del prototipo en una HMI, el cual se pretende visualizar las diferentes señales de los sensores y el resultado de la identificación del sistema.

- En trabajos anteriores, (López, 2016), (Espinosa & Venegas, 2017), (Salazar, 2018) y (Arias, 2017) se realizaron modelos para la discriminación y cuantificación de

sustancias explosivas los mismos que no se han integrado al presente prototipo. Por lo tanto, en este trabajo se integrará un modelo previamente realizado para que pueda trabajar en tiempo real.

1.5 Estructura del documento

En el presente documento está conformado de cinco capítulos que detallan todo el proceso realizado desde la corrección del sistema de instrumentación y control, hasta la implementación de una interfaz gráfica para el análisis de sustancias explosivas y los resultados obtenidos del mismo.

En el capítulo 1, correspondiente a generalidades de la nariz electrónica, se enfoca en explicar el proyecto de la nariz electrónica realizado por Vallejo & Zurita, iniciando con el detalle del estado actual y problemas encontrados en el dispositivo, continuando con los puntos que se repotenciara en el diseño e implementación del prototipo E-NOSE con dopaje automatizado.

En el capítulo 2, correspondiente al sistema de instrumentación y control, se aborda en corregir el flujo del sistema neumático, la recalibración del sistema de sensado químico, del nuevo diseño de control de temperatura y de diseñar un control de dopante de alcohol cuando se analiza varias sustancias por un tiempo prolongado.

Dentro del capítulo 3, se integra una nueva interfaz gráfica para la representación del flujo de aire del sistema neumático, visualización de las señales de la cámara de sensores, la

implementación del sistema de control de temperatura mencionado anteriormente en el capítulo 2 y del modelo clasificador que se implementó para el análisis de TNT y pólvora.

En el capítulo 4, se encuentra las pruebas y resultados, para confirmar el porcentaje de clasificación de sustancias explosivas, comprobación del desempeño en términos de uso y el tiempo de respuesta de la repotenciación de la nariz electrónica.

Para concluir todo el proceso, en el capítulo 5 se encuentran las conclusiones del trabajo de investigación y problemas encontrados en el mismo, para ayuda en trabajos futuros e ir mejorando los modelos de clasificación de las sustancias explosivas.

CAPÍTULO II

SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

En el presente capítulo aborda todas las optimizaciones que se realizó al prototipo de la nariz electrónica elaborada en el trabajo de titulación de (Vallejo & Zurita, 2017). Se presente el desarrollo e implementación de un flujómetro para la medición del sistema neumático de la nariz electrónica, correcciones de hardware de la cámara de sensado químico, diseño del sistema de control de temperatura y la implementación de un control de dopante cuando se analiza varias sustancias en un tiempo prolongado.

2.1 Sistema neumático

Para determinar un flujo de aire correcto y eficiente del dispositivo se debe analizar el proceso de aspiración de la nariz electrónica. En la Figura 10 se muestra el diseño neumático realizado por Vallejo & Zurita los cuales hicieron un análisis de mecánica de fluidos, por lo tanto, se determinarán los flujos del dispositivo que tiene por objetivo imitar el sistema de respiración humana para la detección de sustancias explosivas.

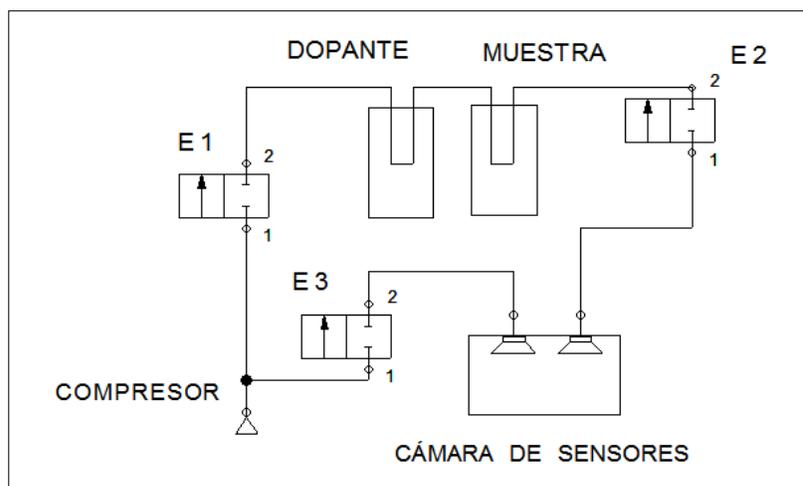


Figura 10. Esquema neumático de respiración de la nariz electrónica
Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)

Debido a que el compresor otorga un flujo volumétrico estándar de 3 lpm se realizaron cambios en las dimensiones de los contenedores de dopante y muestra a analizar, por esta razón se presenta una reducción de flujo, en la Tabla 2 se encuentra el valor del flujo volumétrico real que debe llegar a la cámara de sensores.

Tabla 2

Valor del flujo volumétrico real a la cámara de sensores del prototipo anterior

Diámetro [mm]	Caída de Presión [PSI]	Flujo volumétrico real Q_a [L/min]
ØEntrada-Øpaso1-Øpaso2-Øsalida	-	-
4 - 4 - 4 - 4	27.84	1.1

Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)

Nota: Los valores del flujo volumétrico real propuesto a la cámara de sensores es de 1.1 lpm

En la Figura 11 se muestra de manera gráfica la reducción de flujo del prototipo anterior mediante las aberturas de los contenedores de dopante y muestra a ser analizada. A continuación, se explica las aberturas presentes en el prototipo.

- Ø Entrada: Conexión al compresor de aire.
- Ø Paso 1: Salida de aire del contenedor de alcohol.
- Ø Paso 2: Entrada del contenedor de sustancias explosivas que viene unido con el contenedor de alcohol.
- Ø Salida: Es la reducción de aire que va a la cámara de sensores y es donde se toma el valor del flujo volumétrico real del dispositivo cuando se realiza una aspiración.
- Ø Dopante de alcohol: Abertura para la inyección de alcohol, no se toma en cuenta la pérdida de aire que produce este orificio.

Como primer paso se determina el caudal del prototipo anterior ya que la abertura de dopante de alcohol no es tomada en cuenta, causando que el flujo no sea el correcto por las pérdidas de aire y de esta manera se realizara las correcciones pertinentes para cumplir con el caudal de diseño.

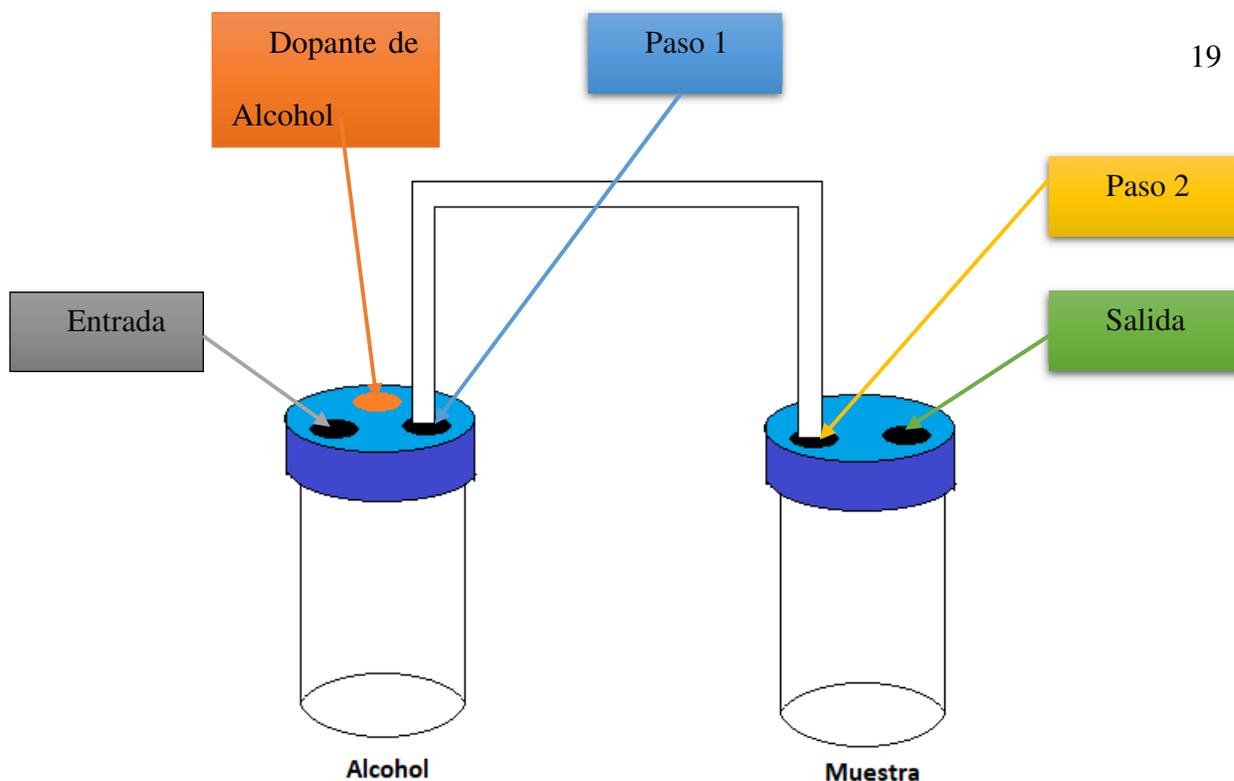


Figura 11. Flujo de entrada, paso 1, paso 2 y salida

2.1.1 Medición de flujo volumétrico de la nariz electrónica

Existen muchos métodos para medir flujos, en la mayoría de los cuales, es importante el conocimiento de algunas características básicas de los fluidos para una buena selección. El procedimiento más común para medir flujos volumétricos es por medio de dispositivos en los que el caudal de aire produce una diferencia de presión como respuesta a una obstrucción en el flujo, en la Figura 12 se encuentra diferentes medidores de presión diferencial como: a) Orificio, b) Cánula, c) Venturi, d) Pitot, e) Codo centrifugo y f) Lazo centrifugo. Todos los medidores presentan una zona muerta debido a su morfología.

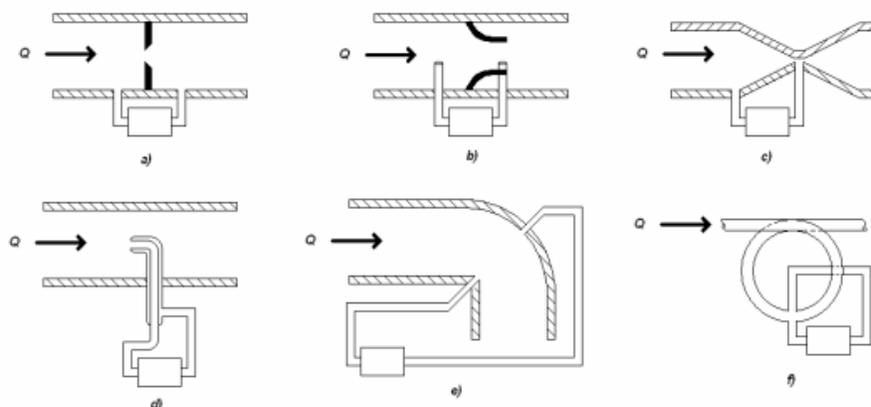


Figura 12. Flujómetros por medición de presión diferencial

Fuente: (Khazan, 1994)

Debido a que la mayoría de flujómetros están diseñados para la industria, no existe un dispositivo como tal en la medición del flujo de aire de narices electrónicas, de manera que la construcción de cualquier flujómetro propuestos en la Figura 12 no sería adecuado para este caso, ya que disminuiría la presión del fluido que atraviesa por la tubería cuando se produzca la aspiración del sistema. Por esta razón, se consideró la construcción del flujómetro con el principio de neumotacógrafo cuyo funcionamiento se basa en la medición de presión diferencial.

De acuerdo a Lucerna existen diversos tipos de neumotacógrafos (Lucerna, 2004), tales como:

- Neumotacógrafo de turbina
- Neumotacógrafo de gradiente térmico
- Neumotacógrafo ultrasónicos
- Neumotacógrafo de resistencia neumática
 - Neumotacógrafo de Fleisch
 - Neumotacógrafo de Lilly

Pero los más utilizados del mundo por su funcionalidad, costo, durabilidad y facilidad de construcción son los neumotacógrafos de resistencia neumática. Dicha resistencia es constante a través del rango de medición y la presión es proporcional al flujo a través del tubo. Esta resistencia puede generarse empleando filtro en malla de fibra sintética.

La estructura del prototipo del sistema a realizar se presentará en un diagrama de bloques como se observa en la Figura 13.

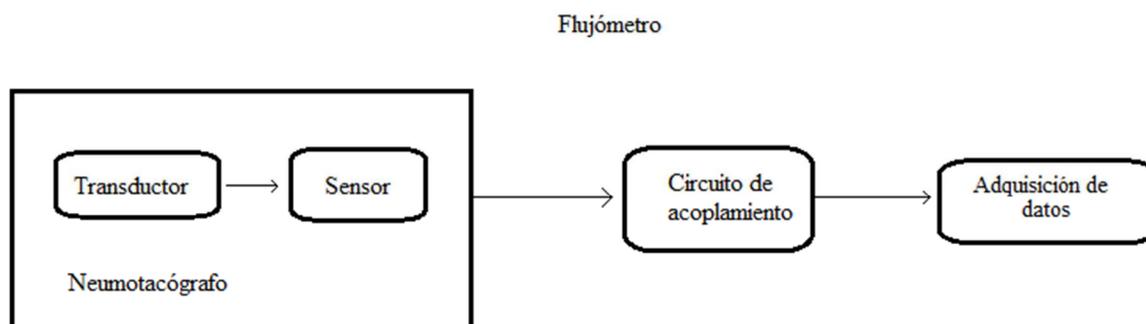


Figura 13. Diagrama de bloques del sistema para la medición de flujo

Para la construcción del flujómetro por medio del principio del neumotacógrafo en la cual su función es adquirir los datos, se emplea un transductor y un sensor para obtener una señal eléctrica en función del flujo. Se recomienda el uso del mismo diámetro de la tubería de la nariz electrónica, el tubo cumple con las funciones de conductor del flujo de aire al sensor y como estructura aislante a corrientes externas. También se sugiere la inserción en la mitad del mismo una resistencia neumática como es una fibra sintética.

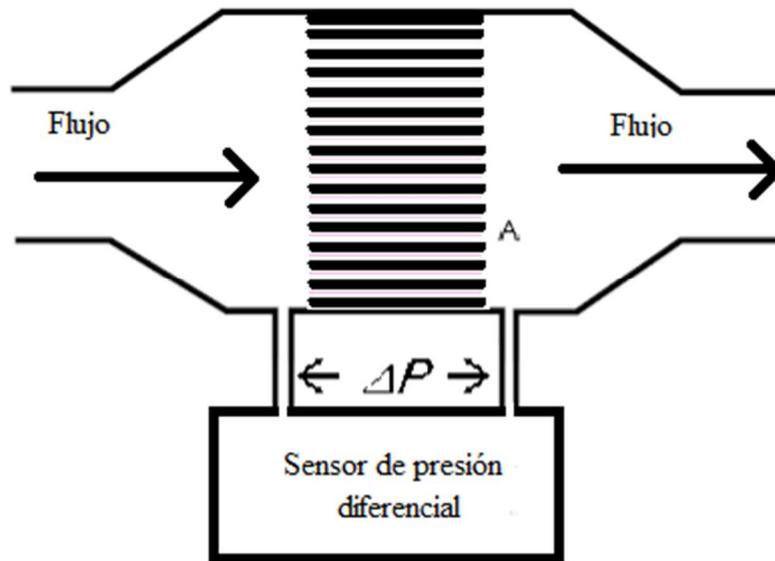


Figura 14. Neumotacógrafo o neumotacómetro

Como se observa en la Figura 14 el diseño de un flujómetro por el principio de un neumotacógrafo cuenta con dos partes:

- **Transductor:** Para la elección del transductor se ha tomado en consideración el uso de un filtro como resistencia neumática. Este transductor básicamente se encarga de transformar la señal del flujo de aire en presión diferencial para que pueda ser captada por el sensor.
- **Sensor:** El sensor se encarga de obtener una señal eléctrica que es función de la variable medida en este caso la presión diferencial.

2.1.1.1 Leyes físicas que describen el flujo de una nariz electrónica.

Las leyes físicas que rigen para la medición del flujo de la nariz electrónica son:

- Número de Reynolds: El número de Reynolds, descrito por Osborne Reynolds en 1883, es un número adimensional utilizado para determinar el comportamiento de un fluido, en particular en los que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Es el cociente resultante de comparar las fuerzas de inercia y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. La fórmula que describe el número de Reynolds en un tubo esta descrito en la ecuación (1) (Beltrán, 2013) (Mott, 2006):

$$R_e = \frac{\rho V_s D}{\mu} = \frac{V_s D}{\nu} \quad (1)$$

Donde:

ρ es la densidad de flujo dada en kg/m^3

V_s es la velocidad característica del fluido, cuya unidad es m/s

μ es la viscosidad dinámica del fluido expresada en $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right) \times 10^{-5}$

D es el diámetro de la tubería a través de la circula el fluido expresa en m

ν es la viscosidad del fluido da en $\left(\frac{m^2}{s}\right) \times 10^{-5}$

En la Tabla 3 se encuentra la clasificación de flujos laminares y turbulentos. El índice de Reynolds puede verse afectado por varias condiciones incidentes, como la quietud inicial del fluido, la forma de entrada del tubo y la rugosidad del tubo.

Tabla 3
Clasificación del flujo de acuerdo al número de Reynolds

Clasificación	Condición	Observación
1	$R_e < 2300$	El flujo sigue un comportamiento laminar
2	$2300 < R_e$	Zona de transición de laminar a turbulento
3	$R_e > 4000$	El flujo es turbulento

- Ley de Poiseuille: La ley de Poiseuille, también llamada Hagen – Poiseuille, descrita en 1840 para determinar el fluido a través de un tubo o tubería nivelada. La viscosidad actúa como una especie de fricción, así que es necesaria una diferencia de presión entre los extremos de un tubo a nivel para el flujo estacionario de cualquier fluido real (Giancoli, 2006). La ley de Poiseuille se aplica en flujos laminares que pasa a través de un tubo cilíndrico, la ecuación (2) describe la ley de Poiseuille.

$$\varphi = \frac{dv}{dt} = v\pi R^2 = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left(\frac{-\Delta P}{\Delta x} \right) = \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{|P_1 - P_2|}{L} \quad (2)$$

Donde:

φ es el flujo dada en m^3/s

v es el volumen de un líquido transferido en el tiempo t expresada en m^3

v es la medida de la velocidad expresada en m/s

x es el vector de dirección de flujo expresado en m .

R es el radio interno del tubo dado en m

μ es la viscosidad dinámica del fluido expresada en $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right) \times 10^{-5}$

ΔP es la diferencia de presión entre las dos terminales expresada en pa

L es la longitud del escrita en m

2.1.1.2 Diseño y desarrollo del flujómetro de la nariz electrónica.

Dada las pautas en el diseño del flujómetro basado en el diseño de un neumotacógrafo se procede a la construcción y elección del sensor apropiado para la medición de la presión diferencial para determinar el flujo de la nariz electrónica.

En la construcción del neumotacógrafo se utilizó un tubo de plástico, de 7.5 centímetros de longitud y 3 milímetros de diámetro. La resistencia neumática que sugieren es de un filtro de fibra sintética, haciendo la función de un neumotacómetro de pantalla Lilly.



Figura 15. Neumotacógrafo con resistencia mecánica

El sensor seleccionado para medir la presión diferencial es el sensor MPX10DP como se observa en la Figura 16 elaborado por Motorola, este sensor en cuestión emplea galgas extensiométricas de silicio y las características técnicas más relevantes del sensor se presentan en la Tabla 4.

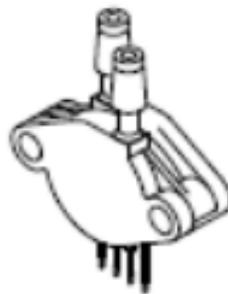


Figura 16. Sensor de presión diferencial MPX10DP

Tabla 4
Características del sensor MPX10DP

Características	Valores	Unidades
Rango de presión diferencial	0 – 10kPa	kPa
Alimentación	3	V
Corriente	6	mA
Voltaje máximo de alimentación	10	V
Sensibilidad	3.5	mV/kPa
Señal de salida:	35 a 70	mV

El sensor de presión diferencial al tener una señal muy pequeña se procede a realizar el acondicionamiento de la señal. En la Figura 17 se encuentra el diagrama esquemático de la instrumentación del sensor.

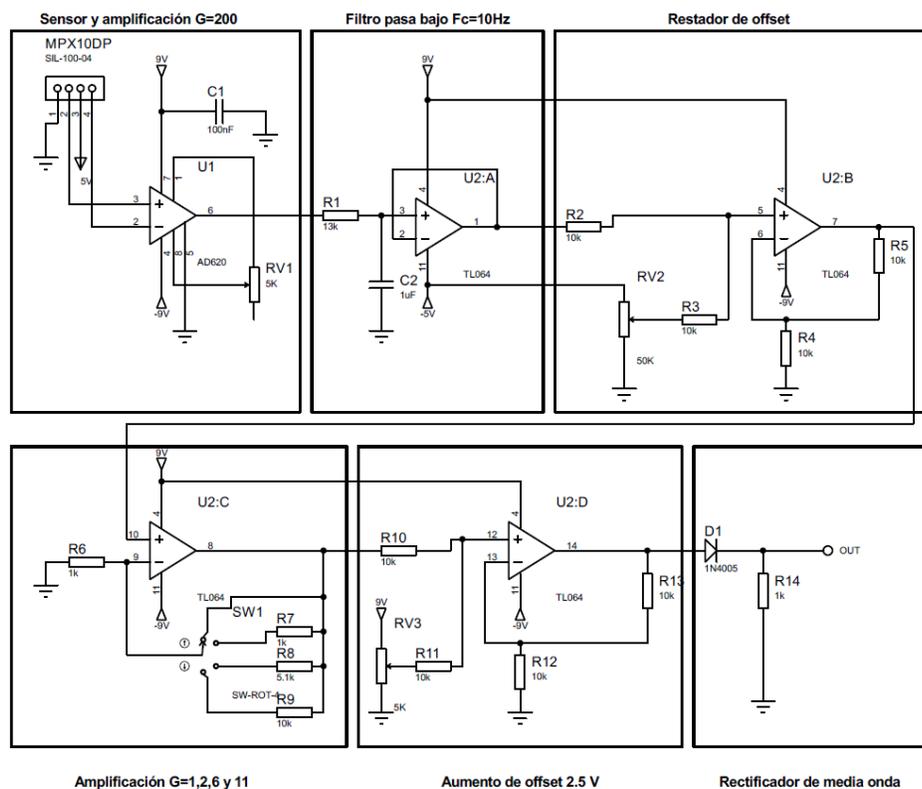


Figura 17. Diagrama esquemático del circuito de instrumentación

A continuación, se explica cada etapa utilizada para el acondicionamiento de la señal:

- Descripción del sensor MPX10DP

El sensor empleado para medir la señal de presión diferencial es de la serie MPX10DP de Motorola que es un transductor sin compensación de temperatura con un rango de medición de 0 a 10 kPa (0 – 1,45 PSI) que proporciona una salida de tensión muy precisa y lineal, directamente proporcional a la diferencia de presión aplicada. Este sensor emplea galgas extensiométricas de silicio (Si) con una sensibilidad de 3,5 mV/kPa ante una alimentación típica de 3 voltios como se observa en la Figura 18.

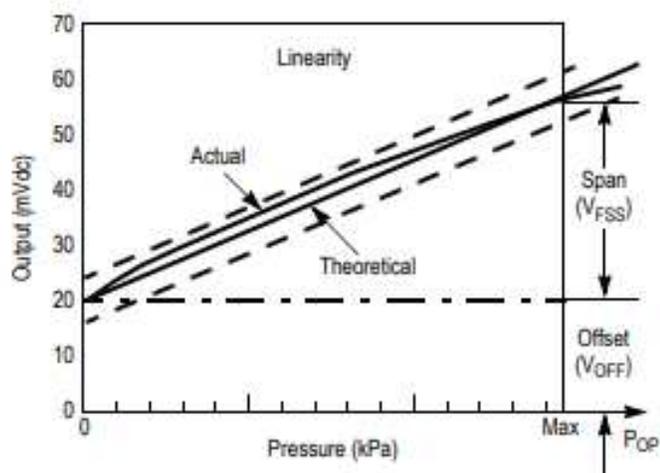


Figura 18. Curva característica Presión Diferencial – Voltaje para el sensor MPX10DP
Fuente:(Motorola, 2008)

- Etapa de Preamplificación del sensor MPX10DP

La señal proveniente del sensor fue amplificada aproximadamente 200 veces por medio de un amplificador de instrumentación AD620AN obteniendo señales de 0 a 5 voltios. La etapa implementada se puede observar en la Figura 19.

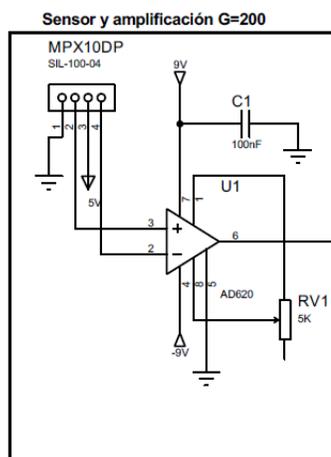


Figura 19. Etapa de preamplificación

En esta etapa se puede ya obtener una señal del flujo respiratorio normal, pero este presenta valores en rangos de 1.5 a 2.5 voltios que no resultan útiles para un análisis.

- Etapa de filtrado

Se implementó un filtro activo pasa bajos de orden 1 para una frecuencia de corte de 10 Hz y ganancia unitaria para filtrar el ruido de la señal. El filtro implementado se puede observar en la Figura 20.

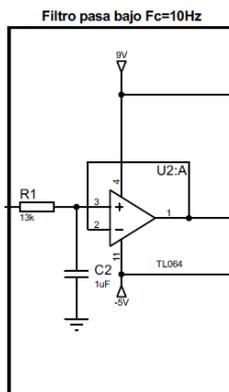


Figura 20. Filtro activo pasa bajos a 10 Hz

En la Figura 21 se observa el diagrama de BODE del filtro pasa bajos, de las respuestas en magnitud y fase se puede obtener que la frecuencia de corte es de 10Hz, además con una atenuación de 20dB por década.

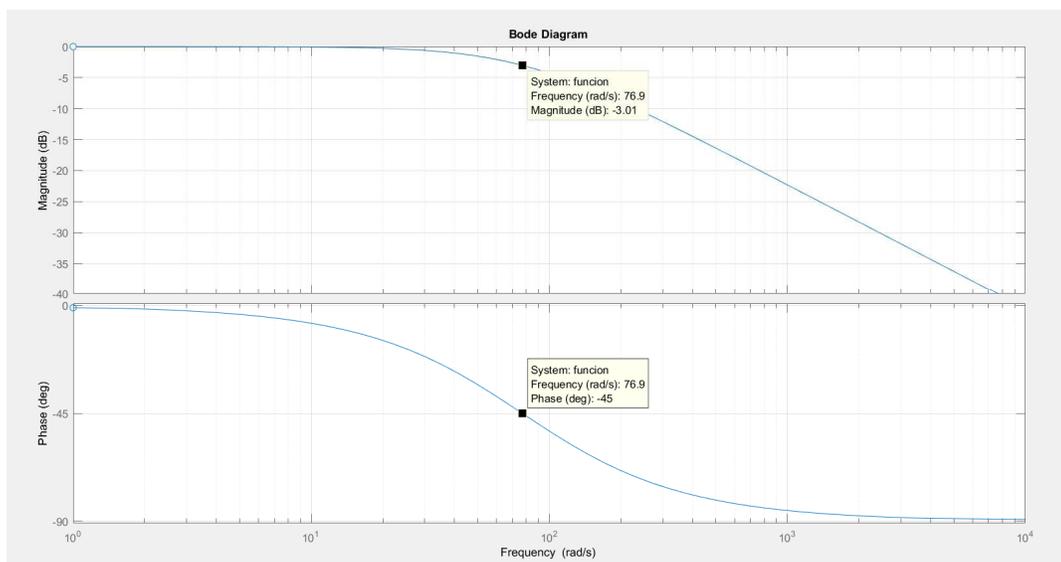


Figura 21. Respuesta en magnitud y fase del filtro pasa bajos

- Eliminación del nivel de continua presente en la señal

Para suprimir el nivel de 2 voltios que presentaba la señal se implementó un sumador de voltaje con amplificador operacional del circuito integrado TL084. En esta etapa se le adiciona a la señal un valor de -2 voltios obtenido mediante un divisor de tensión con la fuente de voltaje negativo. La etapa implementada se puede observar en la Figura 22.

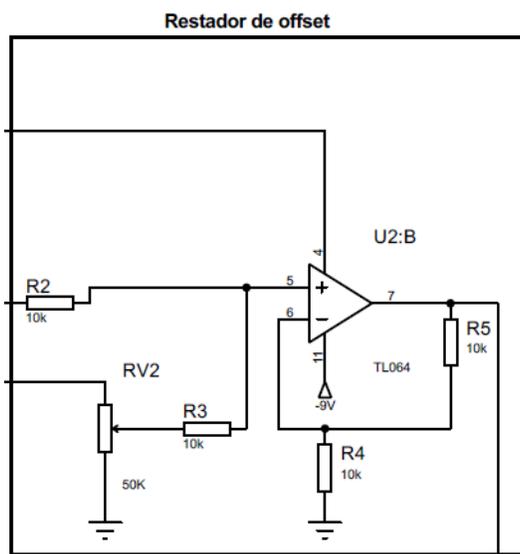
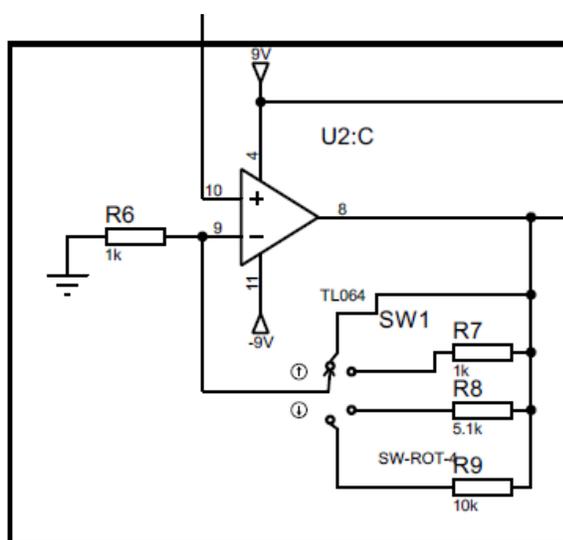


Figura 22. Etapa de supresión de offset

A la salida de esta etapa se puede conseguir ya una señal centrada en cero. Esta etapa es necesaria para posteriormente poder realizar la amplificación de la señal de flujo, ya que con un nivel de offset presente en la señal no se puede realizar amplificaciones con ganancia superior a 2 debido a que los valores de voltaje excederían los 9 voltios que es el máximo valor debido a la alimentación de las baterías.

- Etapa de amplificación de la señal

En esta etapa se pueden obtener ampliificaciones con ganancias de 1, 2, 6 y 11 debido a que se cuenta con un selector de ganancia. El valor se deberá seleccionar de acuerdo al tipo de señal que se desee adquirir, por ejemplo, cuando un flujo presente en la nariz electrónica sea muy pequeño se sugiere emplear una ganancia de 11 o 6 para obtener valores significativos para poder analizar, pero si la señal de flujo se satura con las ganancias de 11,6 o 2 con una ganancia de 1 se podrá distinguir el flujo de aire de la nariz electrónica. El circuito implementado consta de un amplificador operacional y se puede observar en la Figura 23.



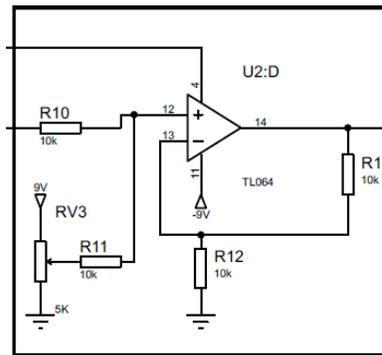
Amplificación $G=1,2,6$ y 11

Figura 23. Etapa de amplificación

Es necesario aclarar que la señal debe tener como valores límites los valores de 2,5 y -2,5 voltios, de este modo mantener el rango que puede manejar el convertor análogo digital de 0 a 5 voltios.

- Desplazamiento de la señal

Una vez obtenida la señal, se debe trasladar la referencia de la señal a un valor de 2,5 voltios para posteriormente digitalizarla. Para lograr esto se implementó un sumador de voltaje con amplificador operacional, como se observa en la Figura 24, obteniendo el voltaje de 2,5 voltios con un divisor de voltaje con la fuente de alimentación positiva.

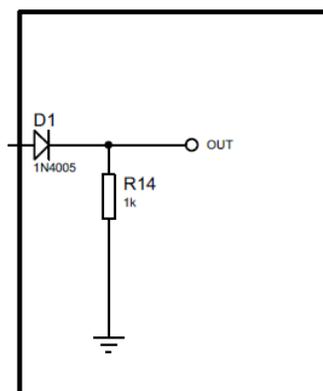


Aumento de offset 2.5 V

Figura 24. Etapa de adición de offset

- Rectificador de media onda

El rectificador de media onda, mostrado en la Figura 25 se implementó para permitir únicamente el paso de voltaje positivo hacia el conversor análogo-digital.



Rectificador de media onda

Figura 25. Rectificador de media onda

- Digitalización de la señal y adquisición de datos

El proceso de digitalización de la señal se realizó mediante una tarjeta Arduino Uno a través de un pin de entrada analógica. Para lograr una correcta digitalización, según el teorema de Nyquist, se necesita una frecuencia de muestreo de al menos 1 KHz siendo la respuesta del sensor diferencial.

La placa de Arduino Uno trabaja a una frecuencia de muestreo de aproximadamente 9 KHz y una resolución de 10 bits, que resulta muy conveniente para la adquisición de la presión diferencial.

La comunicación se realiza por medio del puerto serial para la comunicación entre la placa Arduino y una computadora en este caso para medir el flujo de aspiración de la nariz electrónica.

2.1.1.3 Calibración y medición de flujo de la nariz electrónica.

De acuerdo a la Ley de Poiseuille descrita en la ecuación (3), para la determinación del flujo los valores de las variables correspondientes se detallan en la Tabla 5 y el código implementado

para la adquisición de datos en la medición de flujo de la nariz electrónica se encuentra detallado en el Anexo A; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$\varphi = \frac{\pi R^4 |P_1 - P_2|}{8\mu L} = \frac{\pi R^4 |V_{amplificado}|}{8\mu L} \quad (3)$$

Tabla 5
Valores físicos de la ecuación de Poiseuille

Variable	Valores	Unidad	Observación
L	0.075	m	Longitud entre los puntos de sensado.
R	0.003	m	Radio interno del tubo.
μ	1.8×10^{-5}	$\frac{kg}{m \cdot s}$	Viscosidad dinámica del fluido a 20°C.
π	3.1415926	—	Numero pi.

Para la calibración del sistema es necesario verificar la curva característica del flujo. Mediante la inyección de aire con un compresor y la medición del flujo de aire por medio de un flujómetro como parámetro de referencia, se obtuvieron los valores de la prueba a diferentes flujos de salida.

En la Figura 26 se observa los valores de flujo obtenidos del neumotacómetro respecto al flujo de referencia.

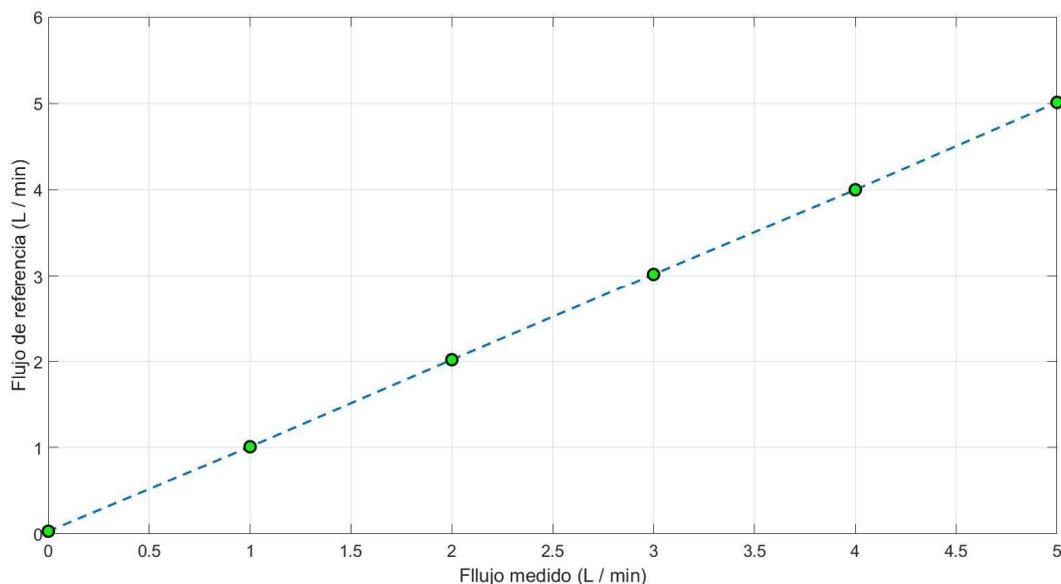


Figura 26. Relación de flujo de referencia vs el flujo medido por medio del principio del neumotacómetro

Al calcular el coeficiente de determinación (R cuadrado), se obtuvo un valor de R^2 de 0.999, donde se puede considerar que el flujómetro construido es válido para medir los flujos de aire de la nariz electrónica.

A continuación, se explica los pasos que se llevó a cabo para determinar el flujo de absorción de la nariz electrónica:

1. Lugar de experimentación: Hogar, ubicado en Carcelén 11 x 6 m^2 .
2. Colocar el flujómetro en la entrada de la cámara de sensores.
3. Realizar la adquisición de datos, para determinar el flujo de absorción del sistema.

4. Prender el sistema de la nariz electrónica.
5. Procesar los datos después de culminar el proceso de absorción.

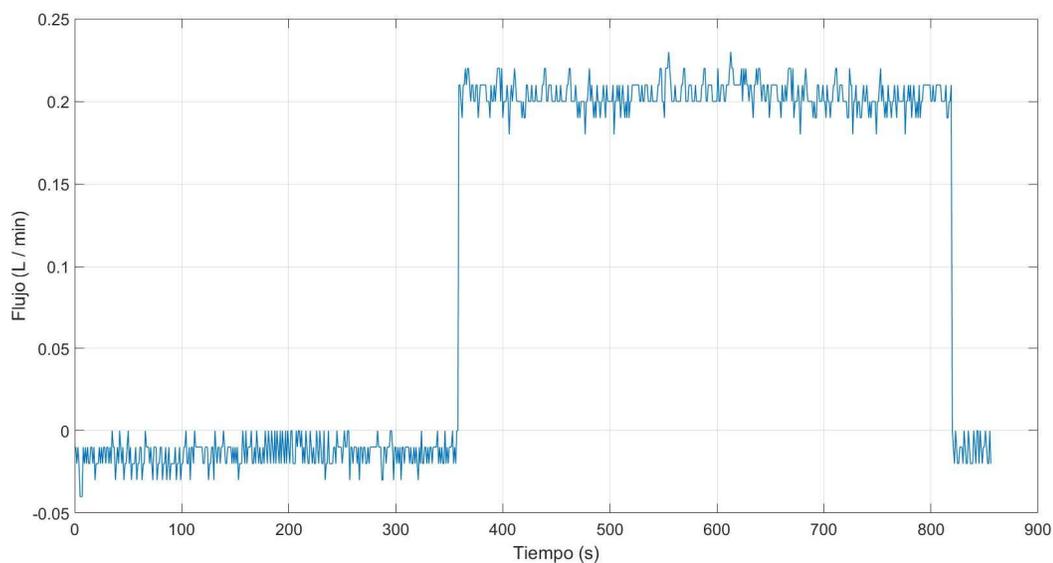


Figura 27. Flujo de absorción de la nariz electrónica.

Después de realizar el procesamiento de la señal como se observa en la Figura 27 se determinó que la señal de flujo en la absorción del sistema, no concuerda con los valores propuestos del flujo volumétrico a la cámara de sensores. La razón a la que el flujo de absorción sea de 0.2 *lpm* viene dado al no tomarse en consideración la abertura en el dopante de alcohol donde la mayor parte del flujo se inyectaba en dicha área, causando problemas en el análisis de las sustancias de interés por la mínima concentración de volátiles que llegaban a captar en la cámara de sensores.

Para que se cumplan el parámetro de flujo se efectuó modificaciones a la salida del dopante de alcohol. Se resolvió el problema al colocar una aguja de jeringa a la salida para reducir el diámetro de la manguera de 4 milímetros a 0.25 milímetros debido a que es necesario que exista una apertura

para la inyección de alcohol, pero simultáneamente la pérdida de flujo de aire debe ser mínima cuando se realiza la absorción de volátiles que va a la cámara de sensores. Los resultados obtenidos después de la modificación realizada como se observa en la Figura 28 cumple con el parámetro del flujo de diseño de 1.1 *lpm*.

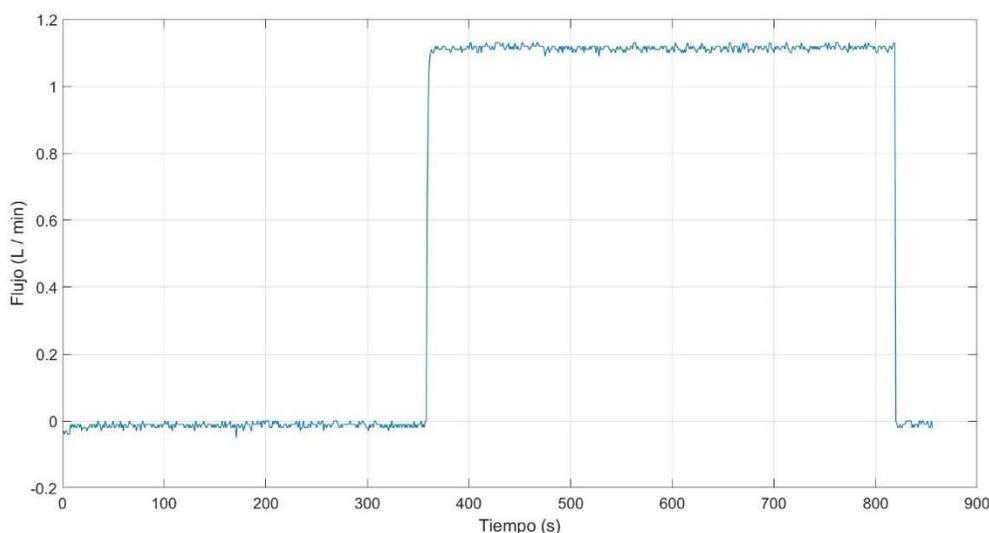


Figura 28. Flujo de absorción de la nariz electrónica después de la modificación

2.2 Cámara de sensores

La cámara de sensores de la nariz electrónica está conformada por una caja hermética, una placa PCB que contiene los sensores químicos, potenciómetros de precisión y varios cables para las conexiones a la tarjeta de adquisición de datos

A continuación, se detalla los puntos a ser revisados y a su vez ser corregidos para realizar las mejores respectivas de la cámara de sensores:

- Placa PCB de la matriz de sensores químicos

Para revisar la placa PCB se procedió a quitar todos los sensores y hacer una prueba de continuidad, se encontró que varios puntos de la placa se encontraban en corto circuito, esto pudo haber sido ocasionado a los cables que estaban en malas condiciones o las pistas de la placa que se encontraban cortocircuitadas.

Para corregir ese error en la placa se procedió a quitar el exceso de cobre que se formó en cada pista cortocircuitada, también se realiza el cambio de potenciómetros, cables defectuosos y poner nuevos puntos de estaño y una limpieza a toda la placa, en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Anexo B se encuentra los arreglos pertinentes a la placa PCB y en la Figura 29 se encuentra la placa con las correcciones realizadas.

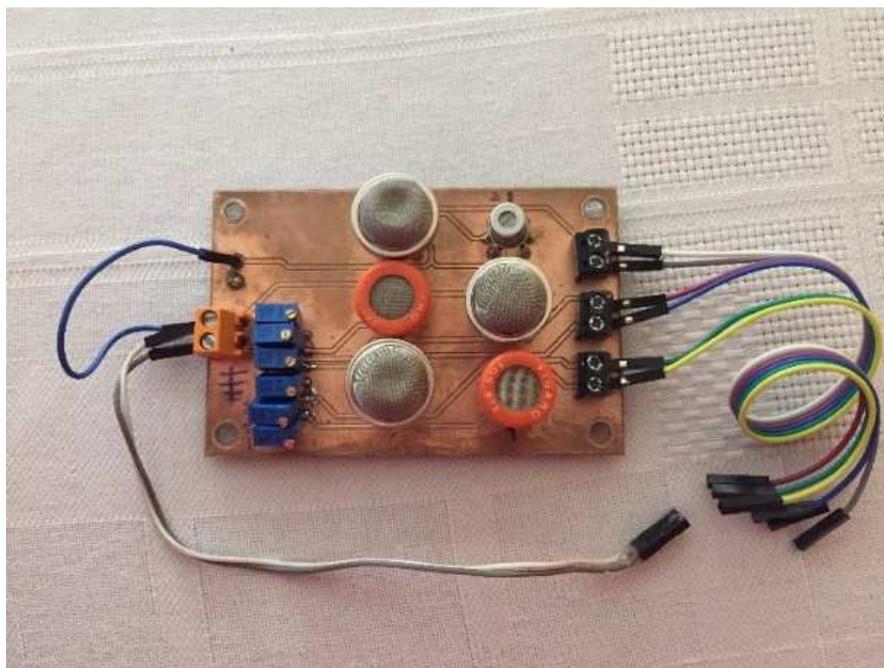


Figura 29. Placa PCB operativa

Después de realizar las debidas correcciones de la placa, se procede al montaje de la placa PCB en la caja hermética.

- Caja hermética.

La caja hermética en su estado actual se encuentra en perfectas condiciones, por lo que no ha sufrido una deriva por los componentes que se utilizan para las pruebas de trinitrotolueno (TNT) y pólvora.

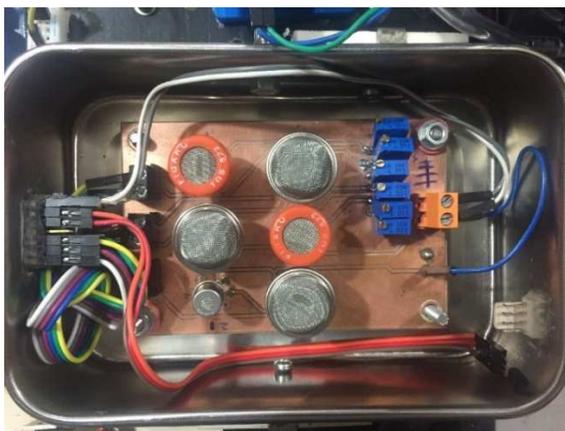


Figura 30. Caja hermética de la nariz electrónica

- Análisis de cada sensor que conforma la nariz electrónica

Para la verificación individual de cada sensor, se procedió a realizar las pruebas de (Standard Test Condition) que son pruebas con condiciones específicas que proporciona el datasheet de los sensores de la familia Fígaro (Figaro Engineering Inc, 2004a).

Los parámetros eléctricos que se tomaron en cuenta para realizar el Standard Test Condition se explican en la Tabla 6. Y se definen a continuación.

Tabla 6
Standard Test Condition

Item	Símbolo	Valores nominales (V)	Unidad
Voltaje “Heather”	V_H	5.0	V
Voltaje de circuito	V_C	5.0	V
Resistencia de carga	R_L	10 $k\Omega$	Ω

En la Figura 31 se muestra los circuitos de acondicionamiento para realizar las pruebas de Standard Test Condition por ello en el apartado (a) se indica la conexión eléctrica de los sensores TGS-(825, 822, 826) y en el apartado (b) se indica del sensor TGS-2610.

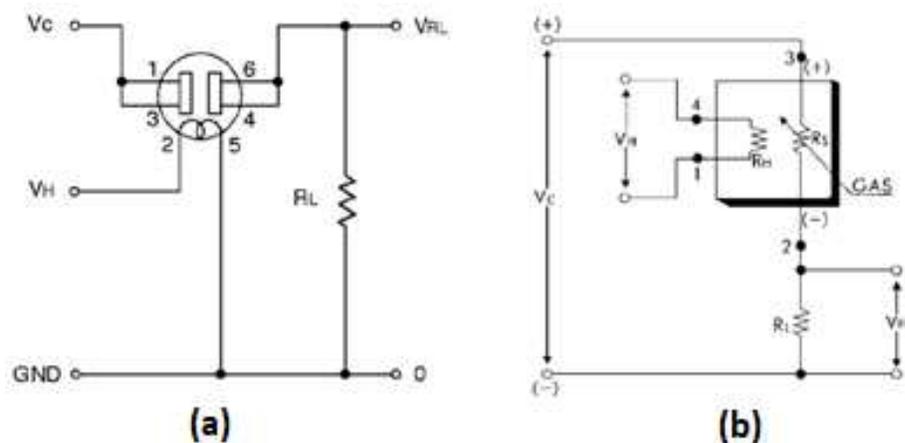


Figura 31. Conexiones eléctricas de los sensores TGS-(825, 826, 822, 2610)
Fuente: (Figaro Engineering Inc, 2004) (Figaro Engineering Inc, 2014)

A su vez se construyó un recipiente para realizar las pruebas a una determinada distancia y concentración de alcohol a la que está expuesta el sensor como se observa en la Figura 32, de esta forma se tendrá valores para poder identificar si existe alguna anomalía en el sensor.



Figura 32. Recipiente de pruebas

A continuación, se explica el modo que se llevó a cabo para determinar la funcionalidad correcta de cada sensor, para el diseño del experimento se tomó en cuenta los siguientes aspectos:

- Lugar de experimentación: Hogar, ubicado en Carcelén $11 \times 6 \text{ m}^2$.
- Tiempo de prueba: 14 minutos, fraccionados en 1 minuto de espera sin exposición de alcohol, 4 minutos expuesto a la sustancia de alcohol, 2 minutos de espera sin exposición de alcohol, 5 min expuesto a la sustancia de alcohol y 2 minutos de espera sin exposición de alcohol.
- Cantidad de sustancia de alcohol: 0.5 ml de alcohol.
- Distancia expuesta del sensor a la sustancia: 11 cm.
- Medición de temperatura que emana el sensor.

El proceso experimental para determinar si existe una deriva en algún sensor de la nariz electrónica es el siguiente:

- Se procede a realizar el acondicionamiento del sensor a analizar por medio de los valores ya establecidos en la Tabla 6.
- Colocar el sensor de temperatura lo más cercano posible al sensor a analizar para la detección de calor.
- Empapar la almohadilla de algodón con alcohol, con la cantidad necesaria para la prueba.
- Realizar el tiempo de prueba establecido en el diseño del experimento.

- Toma de datos en una tarjeta de adquisición para su posterior análisis de los resultados obtenidos.

En la Figura 33 se encuentran las pruebas realizadas a los diferentes tipos de sensores que conforma la nariz electrónica, se puede determinar que la respuesta es diferente a cada sensor tomando en consideración las mismas especificaciones de prueba, al igual que la temperatura que emana cada uno de ellos es diferente debido al no existir un control de temperatura para este tipo de pruebas realizadas.

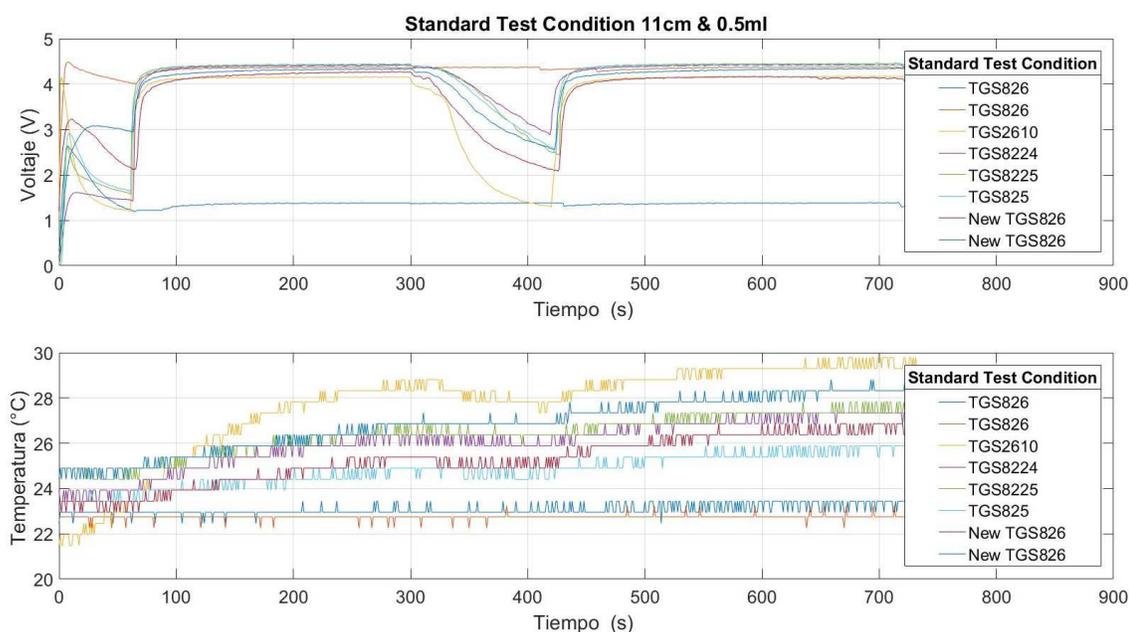


Figura 33. Pruebas realizadas a los sensores de la nariz electrónica

En las pruebas realizadas se seleccionó los sensores que posiblemente estén defectuosos basados en la poca reacción no al alcohol o su temperatura respecto al tiempo. En la Figura 34 se observa que los sensores TGS826 están defectuosos por causa de un cortocircuito o al mal estado

que se encontraban los sensores además se observa que los sensores reemplazados (New TGS826) tienen ya una respuesta apropiada cuando son sometidos a una prueba de Standard Test Condition, de la misma forma la temperatura de cada sensor cambia con respecto al tiempo de prueba.

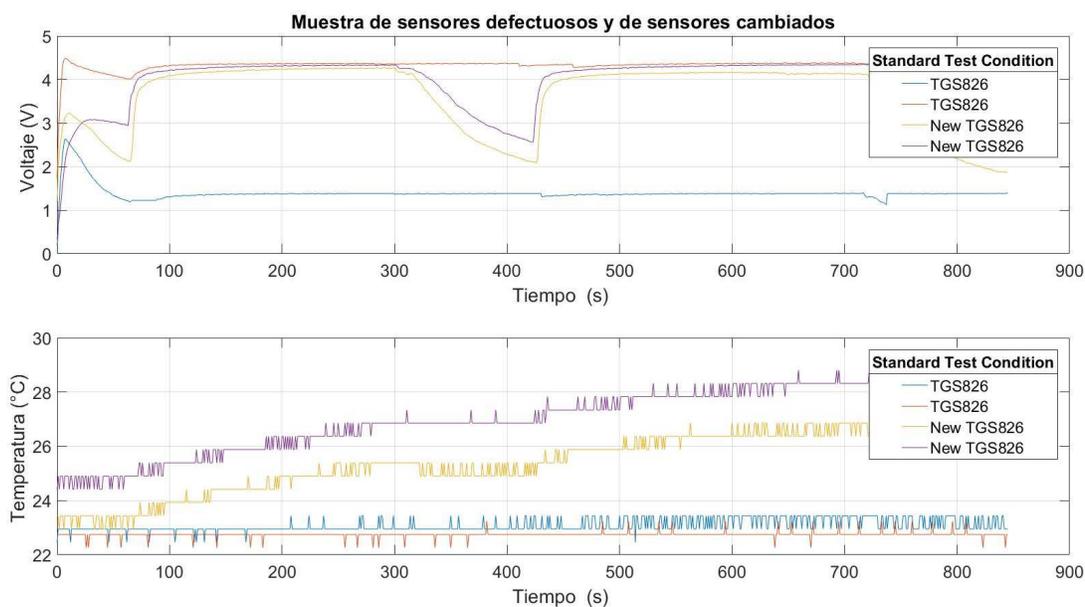


Figura 34. Muestra de sensores TGS826 defectuosos y cambiados

2.2.1 Calibración de los sensores de la nariz electrónica

En la calibración de sensores químicos de la nariz electrónica se debe tomar en consideración algunos factores para el mejor rendimiento de cada uno de los ellos, como la potencia total consumida de los sensores y que el sistema de temperatura sea estable dentro de la cámara de sensores cuando estén expuestos a la sustancia de interés.

Para determinar la potencia consumida de cada sensor, mediante las especificaciones técnicas que proporciona el fabricante FIGARO se tomó los datos de consumo de potencia el cual se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7
Potencia consumida de los sensores

Ord.	Modelo	Potencia	Unidad
1	TGS-822	650	<i>mW</i>
2	TGS-825	660	<i>mW</i>
3	TGS-2610	280	<i>mW</i>
4	TGS-826	833	<i>mW</i>
5	TGS-822	650	<i>mW</i>
6	TGS-826	833	<i>mW</i>

El cálculo de potencia total consumida de los sensores de olor se determina por medio de la ecuación (4).

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

Donde:

n es el número de sensores presentes en la cámara de sensores

P_i es la potencia consumida de cada sensor expresada en *mW*

$$P_{total} = 650 + 660 + 280 + 833 + 650 + 833$$

$$P_{total} = 3906 [mW]$$

Para calcular la fuente adecuada para el sistema por medio de la ecuación (5) se calcula la corriente que debe circular por la cámara de sensores.

$$P = V * I \quad (5)$$

$$I = \frac{3906}{5} = 0.78 [A]$$

Para que el sistema sea fiable las especificaciones de la fuente deben garantizar que la corriente sea de 1[A] o mayor.

Para la calibración del sistema se realizaron pruebas a un nivel de temperatura controlado y expuestos a cantidades de 3,4 y 5 gramos de las sustancias de interés para así lograr la excitación adecuada de cada sensor. Además, se determinaron los valores de R_L mediante las características de sensibilidad que proporcionada los datasheet de cada sensor y con la respuesta de voltaje de cada sensor se optimizo el nivel de resistencia R_L de tal forma que la respuesta de los sensores cuando eran expuestos a diferentes concentraciones estos responden acorde a la sustancia de interés. A continuación, en la Tabla 8 se encuentra las características técnicas de la cámara de sensores.

Tabla 8*Características técnicas, de sensores que conforma la matriz de sensores*

Ord.	Modelo	Voltaje de Heater V_H	Voltaje de acondicionamiento V_C	Resistencia de carga R_L	Temperatura de la cámara
1	TGS-822	5 [V]	5 [V]	10 k Ω	35°C \pm 1°C
2	TGS-825	5 [V]	5 [V]	9.33 k Ω	35°C \pm 1°C
3	TGS-2610	5 [V]	5 [V]	6.73 k Ω	35°C \pm 1°C
4	TGS-826	5 [V]	5 [V]	7.9 k Ω	35°C \pm 1°C
5	TGS-822	5 [V]	5 [V]	3 k Ω	35°C \pm 1°C
6	TGS-826	5 [V]	5 [V]	8.1 k Ω	35°C \pm 1°C

2.3 Sistema de control de temperatura

El control de temperatura de la nariz electrónica que se implementó en el proyecto de (Vallejo & Zurita, 2017) busco que las mediciones de los olores sean confiables al disminuir los efectos ambientales que modifican la temperatura del sistema.

Los sistemas de control, tienen cuatro componentes principales como se observa en la Figura 35, estos son:

- La medida del estado o condición del proceso (Sensor).
- Un controlador que calcula la acción basado en la medición del proceso respecto a un valor preestablecido (Set Point-SP).
- La señal de salida resultante del controlador que se utiliza para manipular la acción del proceso a través del actuador (Variable Manipulada-MV).
- El proceso responde a la señal y cambia su estado (Variable del proceso-PV).

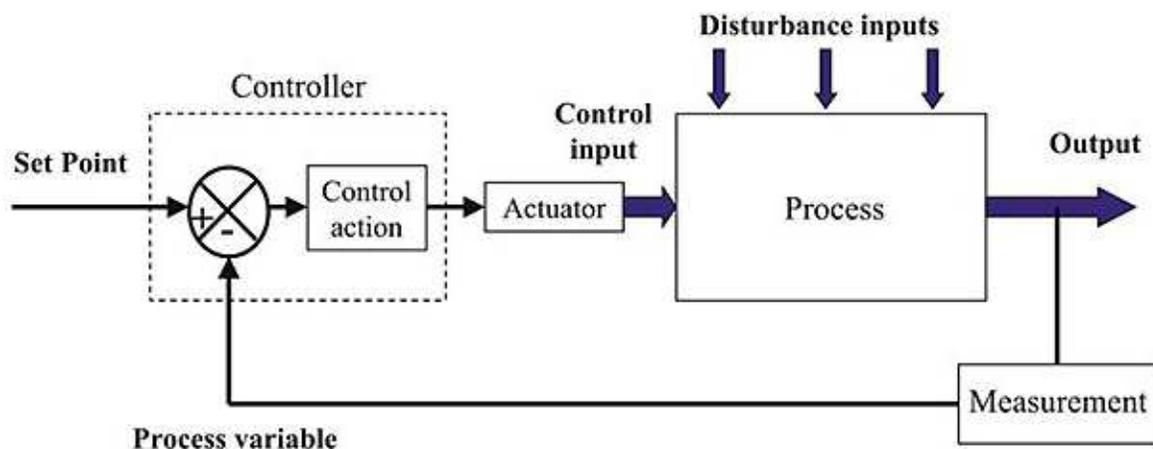


Figura 35. Diagrama de bloques que muestra los elementos de un ciclo de control de proceso
Fuente:(Ltd., n.d.)

Para el nuevo diseño del controlador será necesario identificar el modelo matemático del sistema de temperatura de la nariz electrónica. Al obtener el modelo matemático de la planta, es posible aplicar diferentes técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador.

Existen diferentes tipos de reglas de sintonización que permiten llevar a cabo una sintonización delicada y fina de los controladores PID (Ogata, 2013). En la Figura 36 se observa el control PID de una planta.

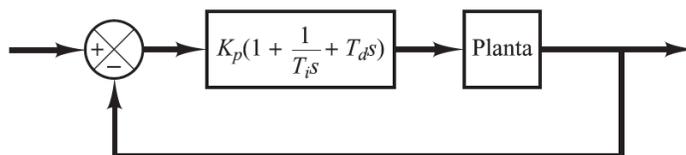


Figura 36. Control PID de una planta
Fuente: (Ogata, 2013)

2.3.1 Selección del sensor

Para la selección del sensor se tomó en consideración los parámetros propuestos por (Vallejo & Zurita, 2017), en la Tabla 9 se indica dichos parámetros.

Tabla 9
Parámetros 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.



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.

Fuente: (Vallejo & Zurita, 2017)

Nota: Con dichas condiciones se escogerá el sensor más adecuado para el sistema

De acuerdo a las características mencionada en la Tabla 9, el sensor LM35 es el más adecuado para el sensado de temperatura por su salida lineal, el rango de temperatura abarca desde -55°C hasta 150°C, una precisión calibrada de 1°C y su bajo costo en el mercado.

El sistema de temperatura contará con dos sensores ubicados a las esquinas de la parte interior de la caja hermética, siendo el primer sensor en el uso de la etapa de control del sistema y el segundo para tener una referencia de temperatura ya que los sensores no se pueden ubicar en el centro por problemas de espacio, en la Figura 37 se encuentra la ubicación de los sensores de temperatura de manera gráfica.

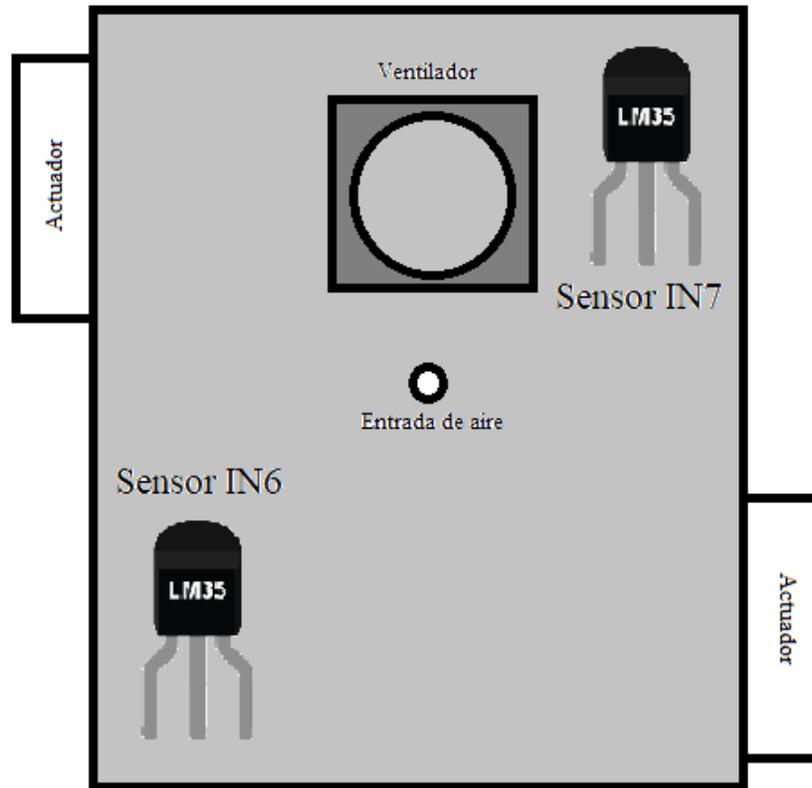


Figura 37. Ubicación de los sensores de temperatura

2.3.2 Identificación del modelo matemático de la planta

Para el modelamiento de la planta, la adquisición de datos de los sensores de temperatura se realizó en una tarjeta Arduino MEGA a una entrada escalón de 3.3 [V], para el experimento se tomaron 5485 lecturas con un tiempo de muestreo de 0.5 [s], en la Figura 38 se observa que la planta es lenta y su estabilización fue en 46 minutos alcanzando su grado de estabilidad en 54°C en el Sensor IN7 y 66°C en el Sensor IN6.

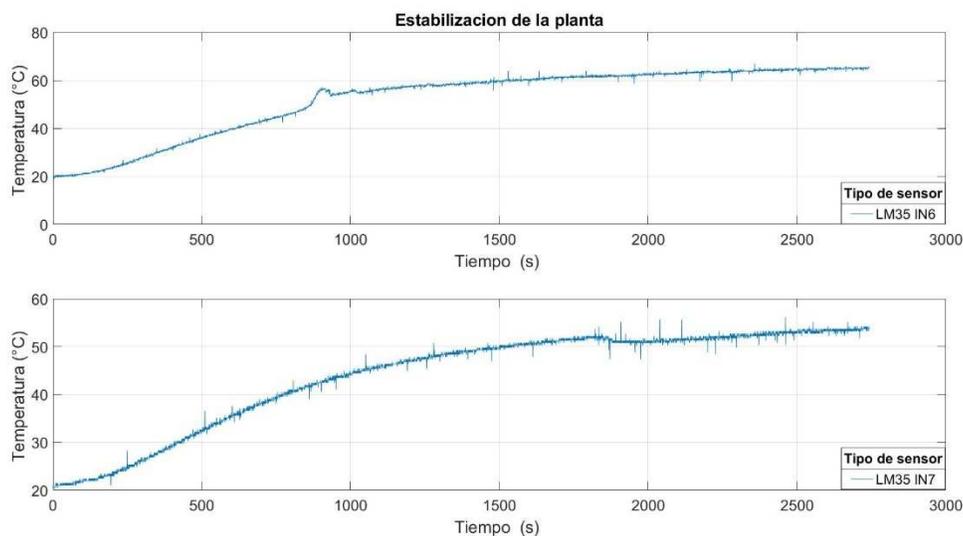


Figura 38. Respuesta de la planta a una entrada escalón

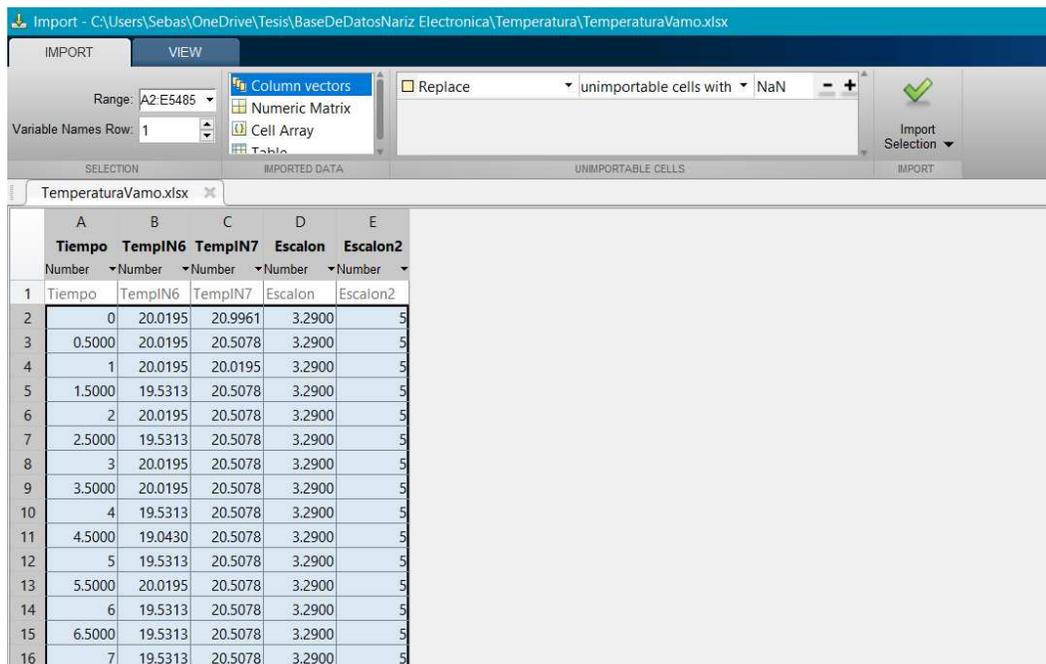
Para obtener la función de transferencia se trabajará con el software matemático MATLAB, siguiendo los pasos que serán descritos a continuación:

1. Con la información adquirida del experimento se importa todos los datos por medio de la función “Import Data”.



Figura 39. Importación de datos del experimento

2. Se escoge el archivo donde se haya almacena la información del experimento y se procede a seleccionarla.



	A	B	C	D	E
	Tiempo	TempIN6	TempIN7	Escalon	Escalon2
1	Tiempo	TempIN6	TempIN7	Escalon	Escalon2
2	0	20.0195	20.9961	3.2900	5
3	0.5000	20.0195	20.5078	3.2900	5
4	1	20.0195	20.0195	3.2900	5
5	1.5000	19.5313	20.5078	3.2900	5
6	2	20.0195	20.5078	3.2900	5
7	2.5000	19.5313	20.5078	3.2900	5
8	3	20.0195	20.5078	3.2900	5
9	3.5000	20.0195	20.5078	3.2900	5
10	4	19.5313	20.5078	3.2900	5
11	4.5000	19.0430	20.5078	3.2900	5
12	5	19.5313	20.5078	3.2900	5
13	5.5000	20.0195	20.5078	3.2900	5
14	6	19.5313	20.5078	3.2900	5
15	6.5000	19.5313	20.5078	3.2900	5
16	7	19.5313	20.5078	3.2900	5

Figura 40. Importación de datos de los datos almacenados del experimento

3. Con la ayuda de la función Ident (System identification o Sistema de identificación), de modo que es usada para la identificación de plantas por medio de los datos recopilados de la planta a identificar.

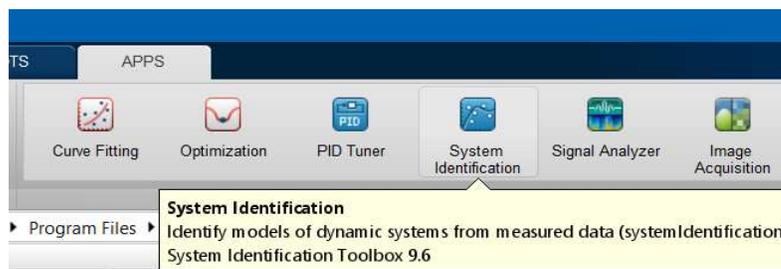


Figura 41. Sistema de identificación

4. En la interfaz de usuario se ingresan las variables de entrada y salida que hemos tomado de la planta, recordando que dichas variables están almacenadas en el Workspace de MatLab.

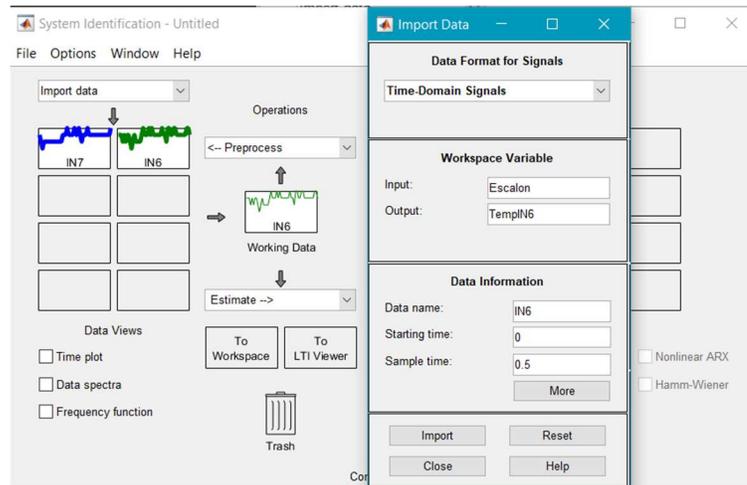


Figura 42. Identificación de la planta por medio del dominio del tiempo

5. Después se procederá en la estimación de la función de transferencia de la planta.

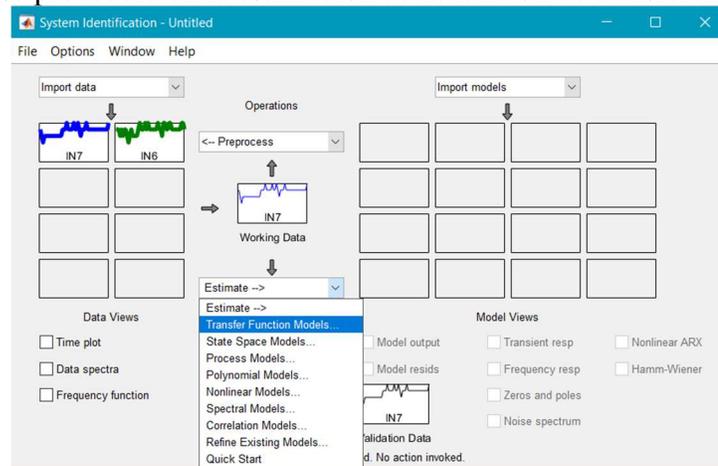


Figura 43. Función de transferencia

6. En la selección del número de polos y zeros por tratarse de una planta de temperatura, se escoge los valores de un polo y cero zeros.

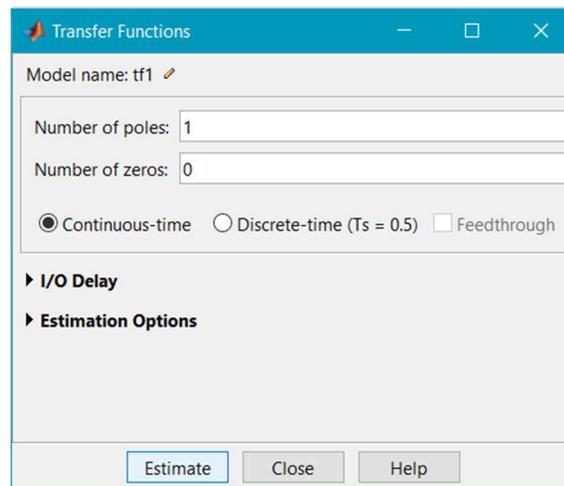


Figura 44. Valores de polos y zeros

7. Se consiguió un ajuste del 88.78 %.

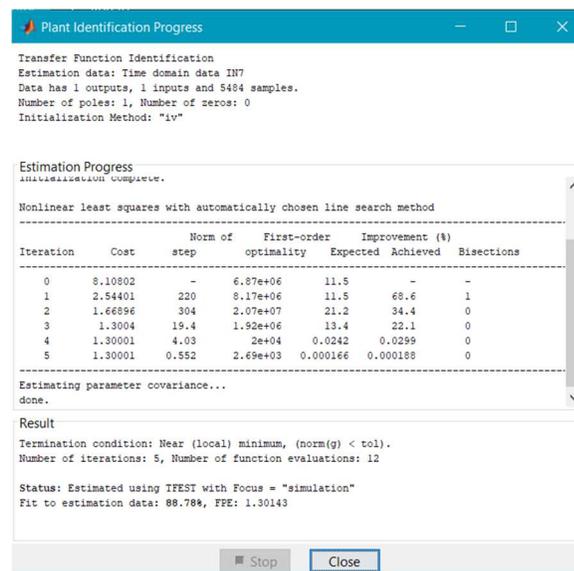


Figura 45. Estimación de parámetros de la planta

8. Al final el software matemático MatLab indica la función de transferencia que rige el sistema.

$$Gp(s) = \frac{0.020}{s + 0.001}$$

2.3.3 Sintonización de los parámetros del control PID

Para poder sintonizar la planta, MatLab proporciona una herramienta llamada “pidtool”, la cual está basada en la sintonización de diferentes técnicas, en el caso de la nariz electrónica por ser un sistema demasiado lento será usado la técnica de control PID.

Para obtener los parámetros de control a continuación se explica los pasos a realizar:

1. Lo primero que se realiza por medio del Comand Window de MatLab se escribe la función pidtool y la función de transferencia previamente modelada.

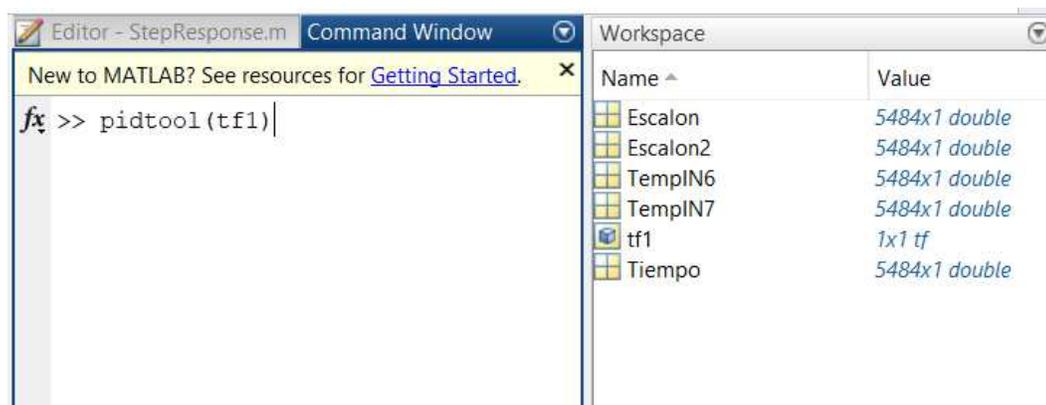


Figura 46. Herramienta de MatLab para sintonización de la planta

2. Se abrirá la interfaz gráfica el cual se encarga de la sintonización adecuada.

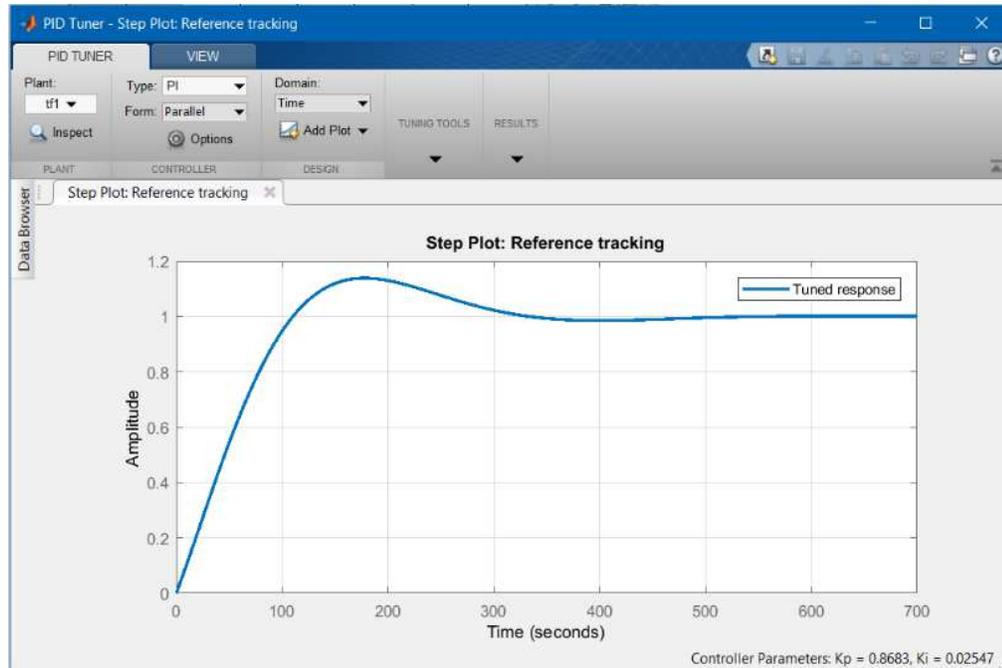


Figura 47. Herramienta pidtool

3. Se procede a realizar el cambio de la forma de control, en este caso viene por defecto Parrallel y lo adecuado es la forma Standard para la sintonización. Después se procederá con los valores que se desee en la sintonización en este caso al tratarse de una planta lenta en el tiempo se requiere una respuesta lenta y en el transitorio sea robusto.

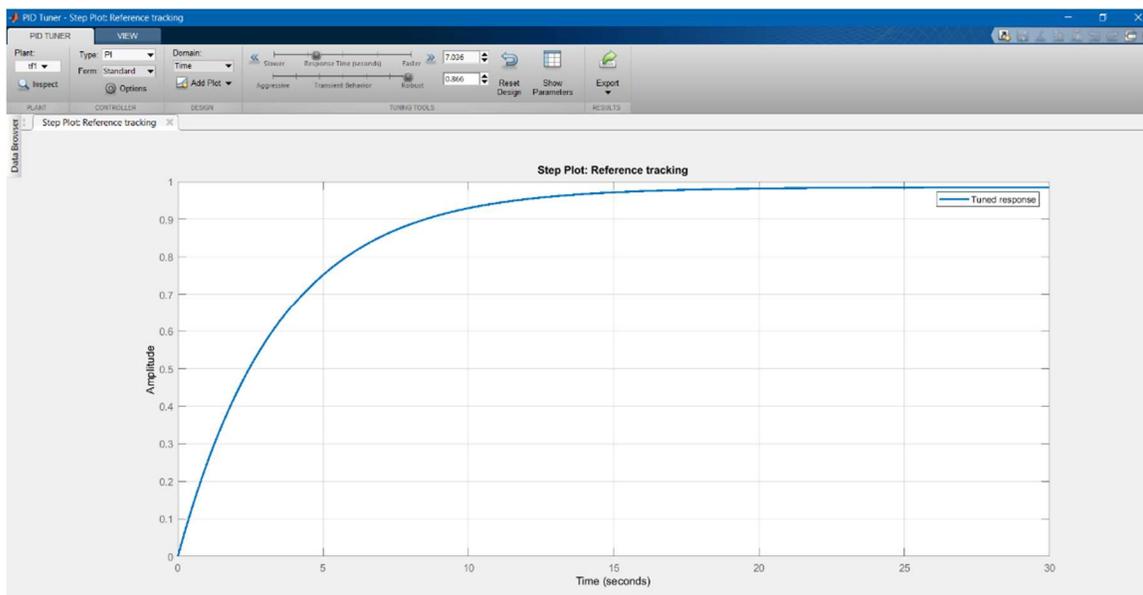


Figura 48 Sintonización PID para el controlador

4. Después se exporta los parámetros del valor de controlador PID hacia el Workspace para así obtener los valores de K_p , T_i y T_d .

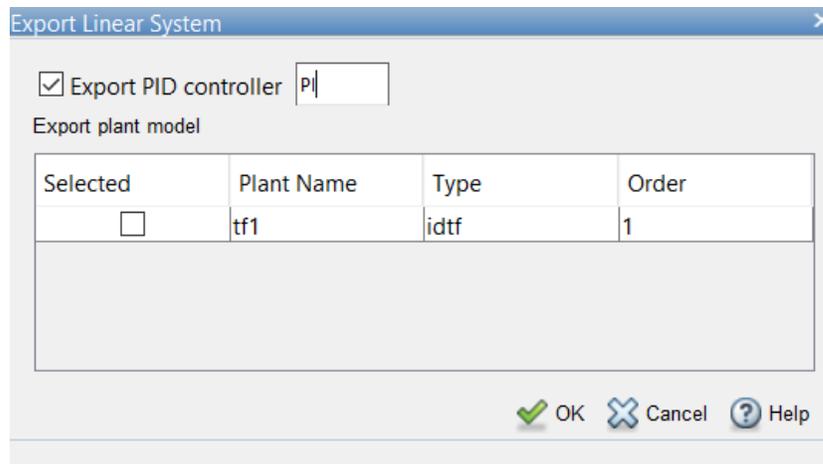


Figura 49. Exportación de valores del controlador PID

5. Los valores sintonizados para el control de temperatura se detallan en la Tabla 10

Tabla 10*Parámetros del controlador*

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	118.5	0.001	0.100

2.3.4 Pruebas de simulación del sistema de control de temperatura

Para poder observar cual será el comportamiento del sistema, se realiza los diferentes tipos de simulaciones de la planta. En la Figura 50 se encuentra la planta en lazo cerrado sin controlador.

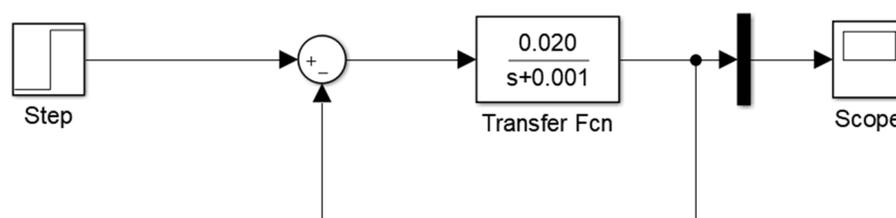


Figura 50. Simulación de la planta de la nariz electrónica sin etapa de control.

En la Figura 51 se indica la respuesta de la planta en lazo cerrado, lo cual se puede determinar el tiempo de subida de 103 [s], el tiempo de estabilización de 450 (s) y el error en estado estacionario es del 0%.

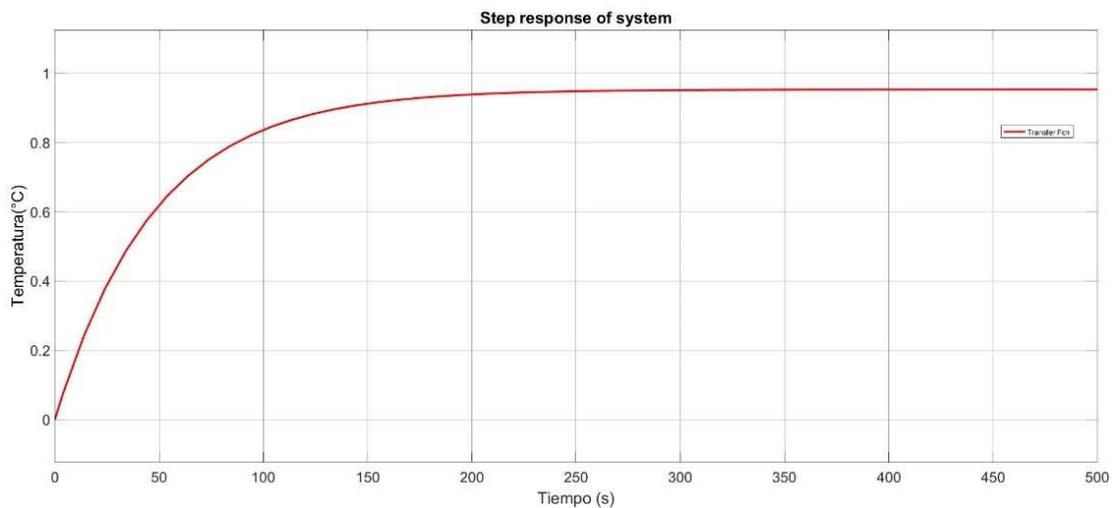


Figura 51. Respuesta del sistema en lazo cerrado sin etapa de control

Debido a que el sistema es lento se determinó los valores del controlador y en la Figura 52 se observa el diagrama de lazo cerrado con la etapa de control al ser sometidos a una entrada escalón y rampa.

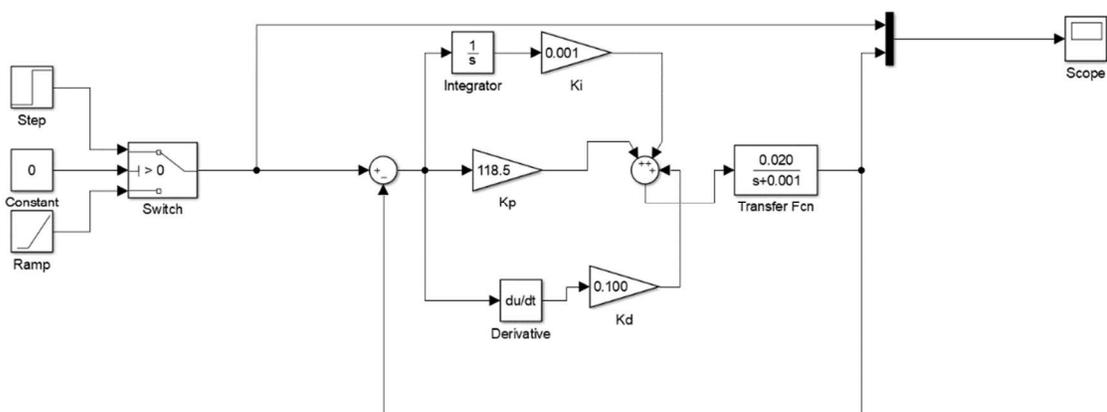


Figura 52. Simulación del sistema de control de temperatura de la nariz electrónica

De igual manera se determina en la Figura 53 que el sistema no tiene ningún sobrepico, el tiempo de rizado es de 0.921 [s], el tiempo de estabilización es de 4 [s] y el error en estado estacionario es del 0%.

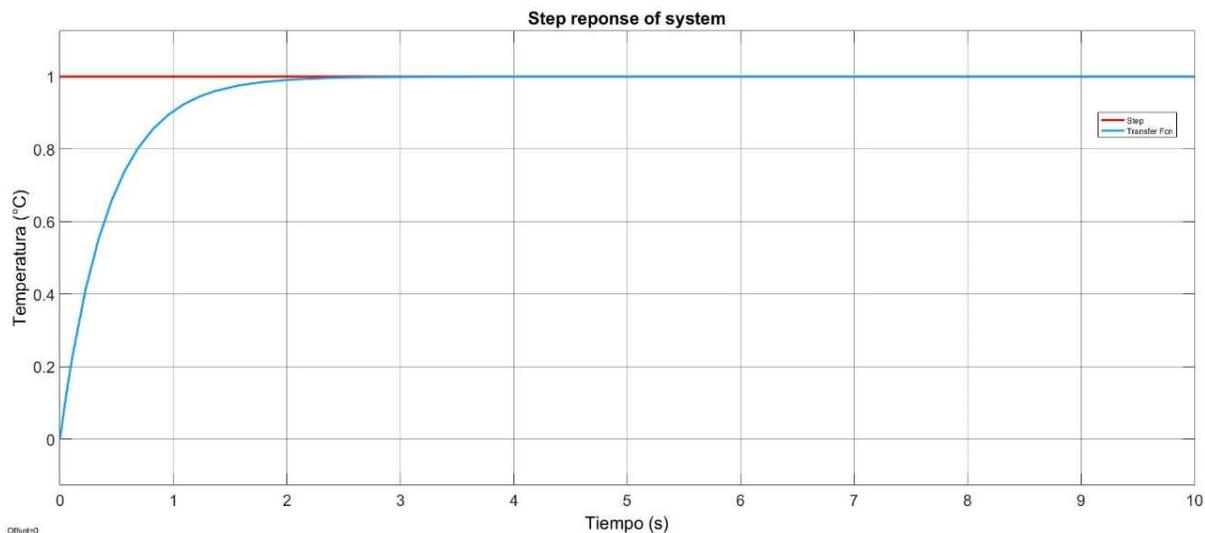


Figura 53. Sistema de control a una entrada escalón.

El sistema al ser sometido a una entrada rampa este tiende a seguir a la entrada, pero el error en estado estable ante una entrada rampa es $1/K$, por lo tanto, el error es menor al 5%.

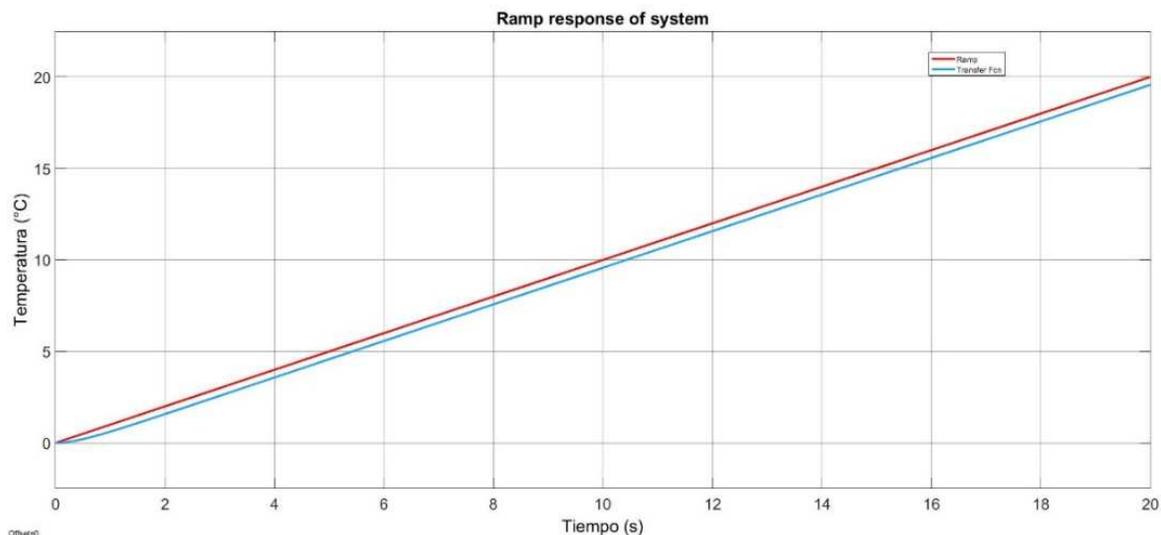


Figura 54. Sistema de control a una entrada rampa

2.3.5 Resultados del sistema de control de temperatura

Con el fin de determinar el funcionamiento del controlador en tiempo real, se realizó la toma de datos a dos tipos de entrada diferente, en el primer experimento se tomaron en cuenta los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11
Parámetros del experimento a entrada escalón

Parámetro	Valor
Entrada	Escalón
Temperatura de referencia	35 [° C]
Tiempo de experimentación	24 [min]
Sensor de temperatura	LM35
Periodo de muestreo	100 [ms]

En la Figura 55 se muestra el comportamiento del sistema a una entrada escalón con el nivel de referencia a 35°C y se toma en consideración las perturbaciones provocadas por la aspiración y limpieza de la nariz electrónica.

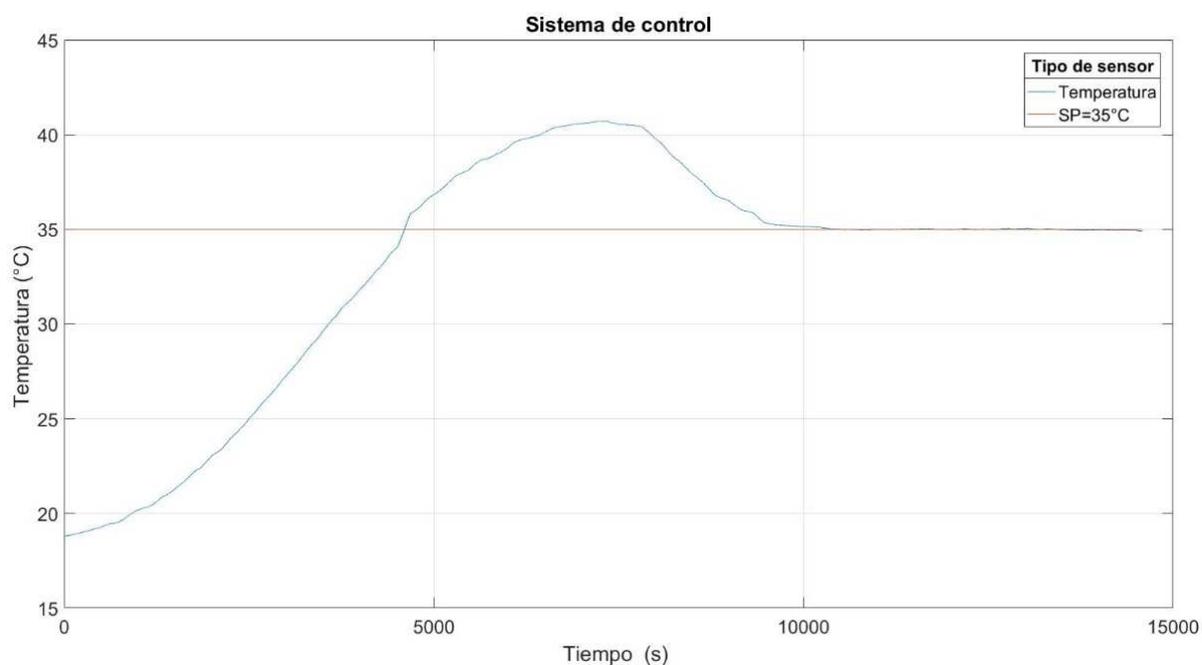


Figura 55. Sistemas de control en tiempo real

De igual manera el sistema se probó para una entrada rampa y en el experimento se tomaron en cuenta los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12

Parámetros del experimento a entrada rampa

Parámetro	Valor
Entrada	Rampa

CONTINÚA →

	37-45 [° C]
Temperatura de referencia	
Tiempo de subida (Rampa)	0.01 [° C/s]
Tiempo de experimentación	14 [min]
Sensor de temperatura	LM35
Periodo de muestreo	100 [ms]

En la Figura 56 se muestra el comportamiento del sistema a una entrada rampa y se toma en consideración las perturbaciones provocadas con la aspiración constante de la nariz electrónica.

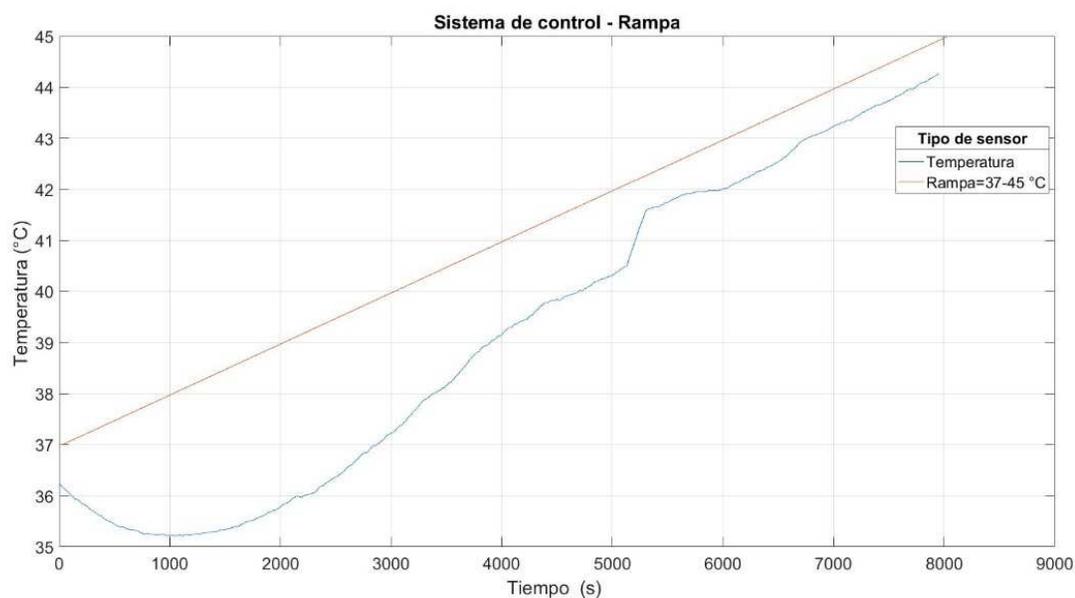


Figura 56. Sistema de control en tiempo ante una entrada rampa

De acuerdo a la repuestas obtenidas se procede a calcular los valores de sobrepico, tiempo de estabilización, tiempo de subida y error en estado estacionario del sistema a diferentes entradas:

- Mp (Sobrepico)

$$Mp\% = \frac{c(tp) - c(\infty)}{c(\infty)} * 100\% \quad (6)$$

En la ecuación (6), 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.

Donde:

$c(tp)$ es el tiempo donde la respuesta alcanza el primer pico del sobrepaso.

$c(\infty)$ es el valor de temperatura en el estado estacionario.

$$Mp_{escalon}\% = \frac{40.7 - 35}{35} * 100\%$$

$$Mp_{escalon}\% = 16.3\%$$

El sobre pico observado se produce debido a las resistencias de potencia que se utilizan tardan en calentar y cuando llegan a la temperatura deseada por el usuario estas mantienen la energía calórica produciendo así el sobrepico.

- ts: Tiempo de estabilización

$$ts_{escalon} = 17.3 [min]$$

$$ts_{rampa} = 10 [min]$$

- E_{SS} : Error en estado estacionario

$$E_{SS_{escalon}} = \left| \frac{34.98 - 35}{35} \right| * 100\%$$

$$E_{SS_{escalon}} = 0.05\%$$

$$E_{SS_{rampa}} = \left| \frac{44.22 - 44.88}{44.88} \right| * 100\%$$

$$E_{SS_{rampa}} = 1.47\%$$

El nuevo sistema de control de temperatura del prototipo al probarse el desempeño ante una entrada rampa este fue menor al 5%, por lo tanto, si se cumple el planeamiento de diseño.

2.4 Dopaje automático

Uno de los problemas del sistema es que no existe un control del dopante cuando se analiza varias sustancias por un tiempo prologando y por lo tanto se evapora, de manera que, se realizó una inspección de la bomba para determinar el correcto funcionamiento y no proceder a un cambio.

Cuando se puso a prueba la funcionalidad de la bomba, se encontraron errores los cuales se describen a continuación:

- Al encender la bomba el alcohol que debería depositarse al vial no funcionaba.
- La bomba producía un tipo de sonido de cascabeleo ocasionado por el rotor del motor que se encontraba oxidado.



Figura 57. Oxidación de la bomba

La bomba al no encontrarse en perfecto estado se procedió al cambio de ella, tomando en consideración que la bomba sea para líquidos y no sufra algún tipo de oxidación en un futuro, sea de bajo costo, tenga tamaño reducido y que se encuentre en el mercado local. La bomba seleccionada es la bomba Brushless DC Pump y algunos de los parámetros están descritos en la Tabla 13 y en la Figura 58 se encuentra la bomba con el acoplamiento del recipiente de alcohol.

Tabla 13
Parámetros principales de la bomba

Parámetro	Dimensión
Voltaje	12 VCD
Caudal	240 L/H
Corriente	<100 mA
Potencia	36W
Diámetro de entrada y salida	5 mm



Figura 58. Bomba de alcohol

Otro de los problemas en el dopaje automático de la nariz electrónica al no tomarse en consideración la abertura del dopante de alcohol. Se procedió en colocar una aguja de jeringa a la salida para reducir el diámetro de la manguera de 4 milímetros a 0.25 milímetros, al reducir el diámetro donde sale el alcohol el caudal se reduce, pero la presión aumenta.



Figura 59. Colocación de una aguja a la salida del flujo de alcohol.

Al reducir el diámetro de salida del dopaje automático se debe determinar el nuevo caudal. A continuación, se detalla los pasos para determinar del nuevo caudal de salida de alcohol.

- Lugar de experimentación: Hogar, ubicado en Carcelén 11 x 6 m².
- Activar la bomba.
- Tomar el tiempo de llenado del vial de cada mililitro.
- Desactivar la bomba cuando el vial llegue a 5ml.
- Realizar 3 réplicas consecutivas del llenado del vial de alcohol.

En la Figura 60 se observa las tres réplicas de llenado, se puede establecer que el promedio de llenado de 5 [ml] ocurre a los 27 [s], lo cual se puede determinar que el caudal de la bomba es de

$$11 \frac{ml}{min}.$$

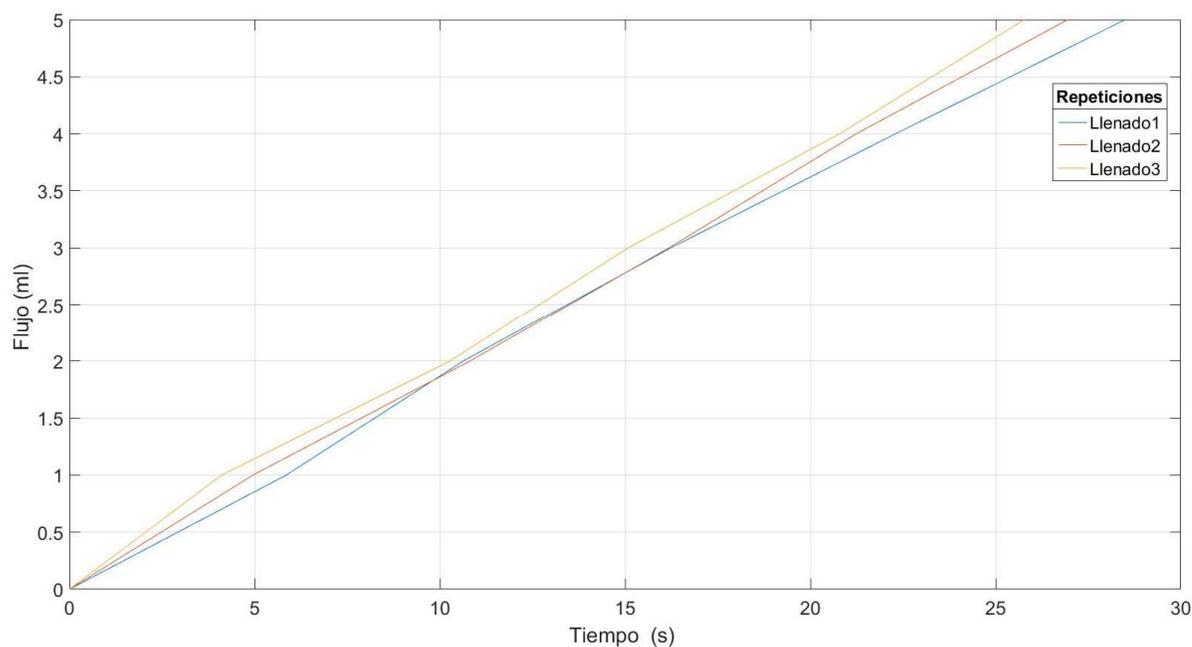


Figura 60. Réplicas en el llenado del contenedor de alcohol

2.4.1 Control de lazo abierto

Para controlar el nivel de alcohol que se deposita en el vial se realiza un control de lazo abierto por lo cual la acción de control (Señal de salida del controlador OP) no es una función de la PV (variable de proceso). De esta forma el control de lazo abierto no se autocorrigue cuando estos PV se desvían.

Para analizar la cantidad que se consume y evapora en el uso de la nariz electrónica, en la Tabla 14 se encuentra el experimento durante 5 horas. Por lo tanto, se establece que en el uso continuo durante 1 hora la cantidad de reducción de alcohol es de aproximadamente 0.1 [ml].

Tabla 14
Datos experimentales del consumo de alcohol

Tiempo [H]	Alcohol [ml]
1	0.1
2	0.2
3	0.3
4	0.4
5	0.5

Para controlar que en el dopante siempre este lleno el tiempo de inyección que deberá realizarse es cada hora transcurrida y además el tiempo de activación de la bomba debe ser 2 [s] para llenar 0.1[ml]. A continuación, en la Figura 61 se muestra el diagrama de flujo del sistema de dopaje automático de la nariz electrónica, en este programa se activa la bomba que inyectará alcohol al depósito de dopante por un tiempo de 2 [s] que es el tiempo en el cual se llena 0.1 [ml] de alcohol.



Figura 61. Diagrama de flujo del proceso de dopaje automático

Por medio del dopaje automático que se realizó en el sistema ahora existirá un control del dopante presente en el vial cuando se analiza varias sustancias por un tiempo prologado.

CAPÍTULO III

INTERFAZ GRÁFICA Y MODELO DEL SISTEMA

En este capítulo se realizó el diseño de una interfaz gráfica amigable al usuario utilizando como referencia la norma GEDIS y de la implementación de un modelo de clasificación de explosivos elaborado en el trabajo de titulación de (De la Cruz, 2019) para la discriminación de sustancias ON-LINE.

3.1 Interfaz gráfica

La interfaz de usuario es en la mayoría de los casos el componente más crítico del sistema. Usuarios y operadores generalmente no entiende el mundo de la programación y de alguna manera dificulta el entendimiento del proceso del sistema.

El entorno gráfico que fue elegido para el presente trabajo es LabView, este programa está orientado para aplicaciones de control de equipos electrónicos usados en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo cual se conoce como instrumentación virtual(Branco, León, Novo, & Otero, 2005).

Para lograr una interfaz gráfica atractiva para el usuario se toma en cuenta dos conceptos básicos a la hora de diseñar la interfaz gráfica:

- Visibilidad, para poder hacer una acción sobre un objeto debe ser visible
- Comprensión intuitiva, el objeto debe evidenciar en que parte tenemos que hacer la acción y como tenemos que hacer.

Para el diseño de la interfaz gráfica se tomó en cuenta la guía ergonómica de diseño de interfaz de supervisión GEDIS donde ofrece un método de diseño especializado en sistemas de control (Harris, 2007). En la Figura 62 se detalla un ejemplo de la distribución de objetos para las pantallas que conforman la nariz electrónica.

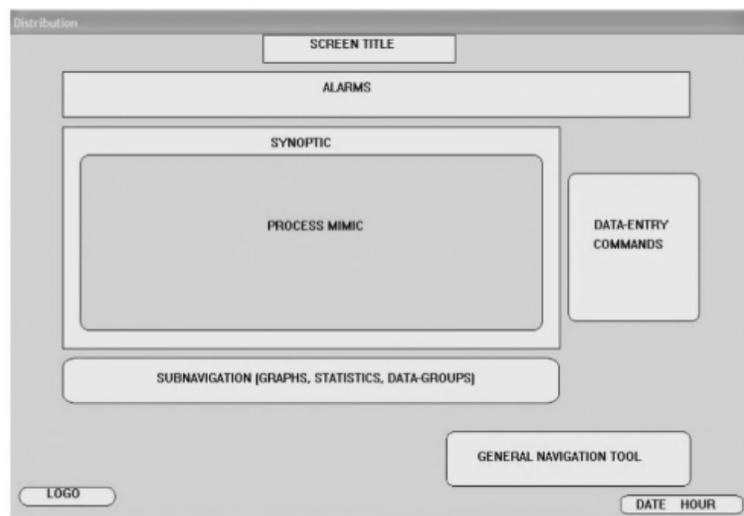


Figura 62. Ejemplo de distribución de objetos dentro de la pantalla para el indicador de distribución

Fuente: (Harris, 2007)

3.1.1 Diseño de la interfaz de usuario

El diseño de la pantalla fue creado a partir de ciertos parámetros que sugiere la guía GEDIS, resultando la navegación mucho más fácil y eficiente en el manejo para el usuario.

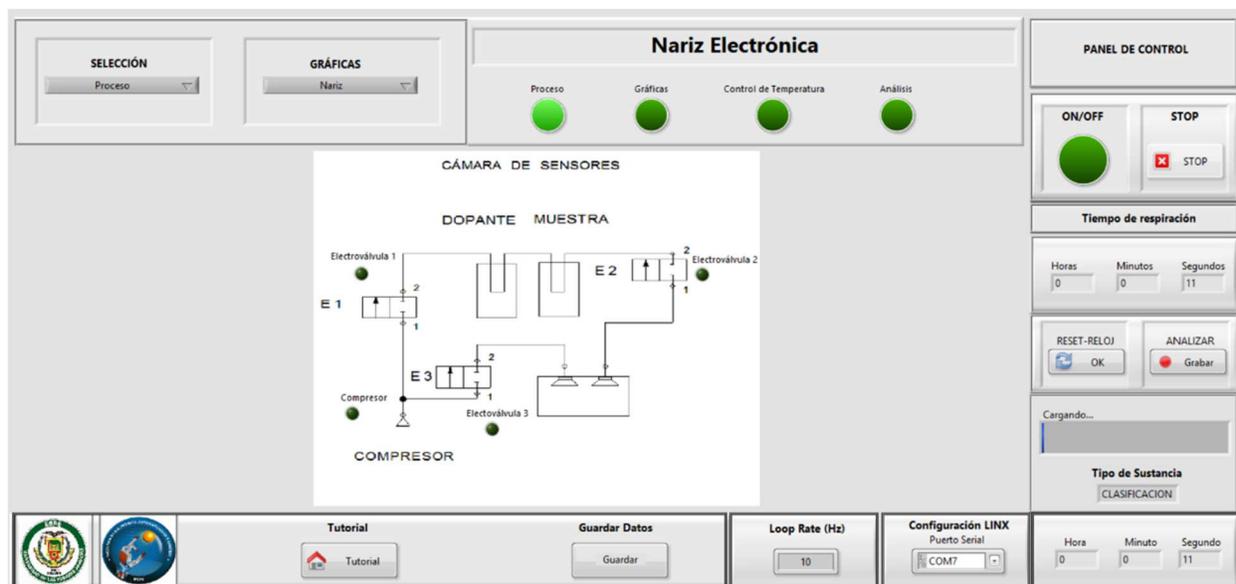


Figura 63. Interfaz grafica

A continuación, se explica el uso de cada elemento que conforma la interfaz grafica:

En la Figura 64 el usuario al pulsar el botón de Tutorial se abrirá una página web con un video explicativo del uso de la nariz electrónica, además el usuario tiene la disponibilidad de guardar en un archivo Excel los datos de los sensores de temperatura y de olor.

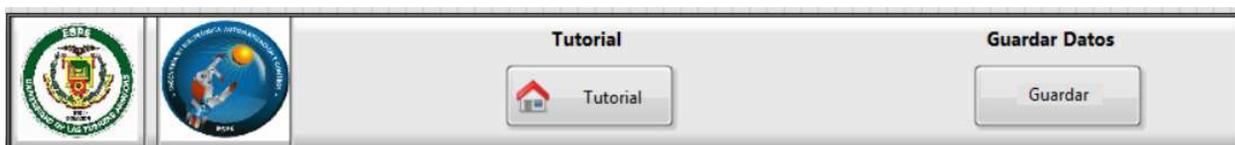


Figura 64. Botones de ayuda para el usuario

En la Figura 65 se realiza la configuración de la tarjeta de acuerdo en que puerto serial esta dicha comunicación.



Figura 65. Configuración de la tarjeta a utilizar

Si el usuario no está familiarizado con la interfaz gráfica por medio de los leds indicadores, podrá orientarse de la pantalla seleccionada.



Figura 66. Identificación de la pantalla utilizada

El panel de control cuenta con los siguientes puntos:

- El botón de **ON/OFF** sirve para encender y apagar el sistema en cualquier momento.
- El botón de **STOP** sirve para el paro de emergencia o reiniciar el análisis de sustancias.
- El botón de **RESET-RELOJ** reinicia el tiempo de respiración.
- El botón de **ANALIZAR** realiza la recopilación de datos de los sensores de olor.
- El **tiempo de respiración** es el encargado de cumplir con el tiempo de aspiración y limpieza del sistema.
- El reloj de proceso se encarga de tomar la hora que transcurre cuando se pone en funcionamiento todo el sistema.

- El indicador de **Cargando...** es una barra de proceso que permite mostrar de forma gráfica el estado de avance de la sustancia a analizar.
- El indicador **Tipo de sustancia** nos muestra de forma cualitativa la sustancia analizada.

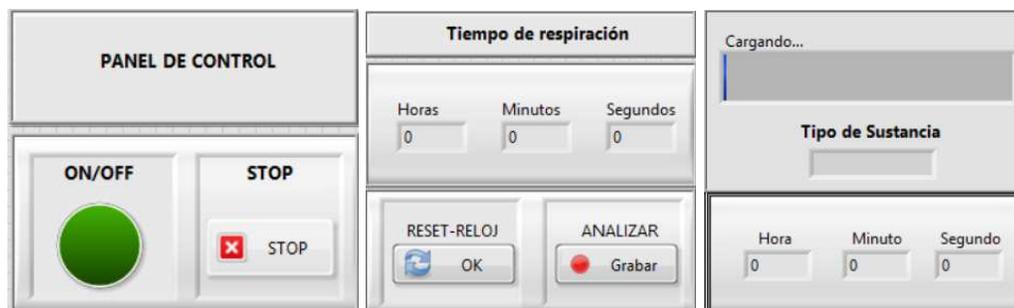


Figura 67. Panel control

En la Figura 68 se encuentra el panel de navegación de las pantallas a utilizar.



Figura 68. Panel de navegación

La interfaz de la nariz electrónica contará con 4 pantallas, las cuales se detallan a continuación:

1. Pantalla del proceso de flujo de aire.

En la pantalla de flujo contará con el diagrama neumático para ver en tiempo real las activaciones de las electroválvulas y la bomba.

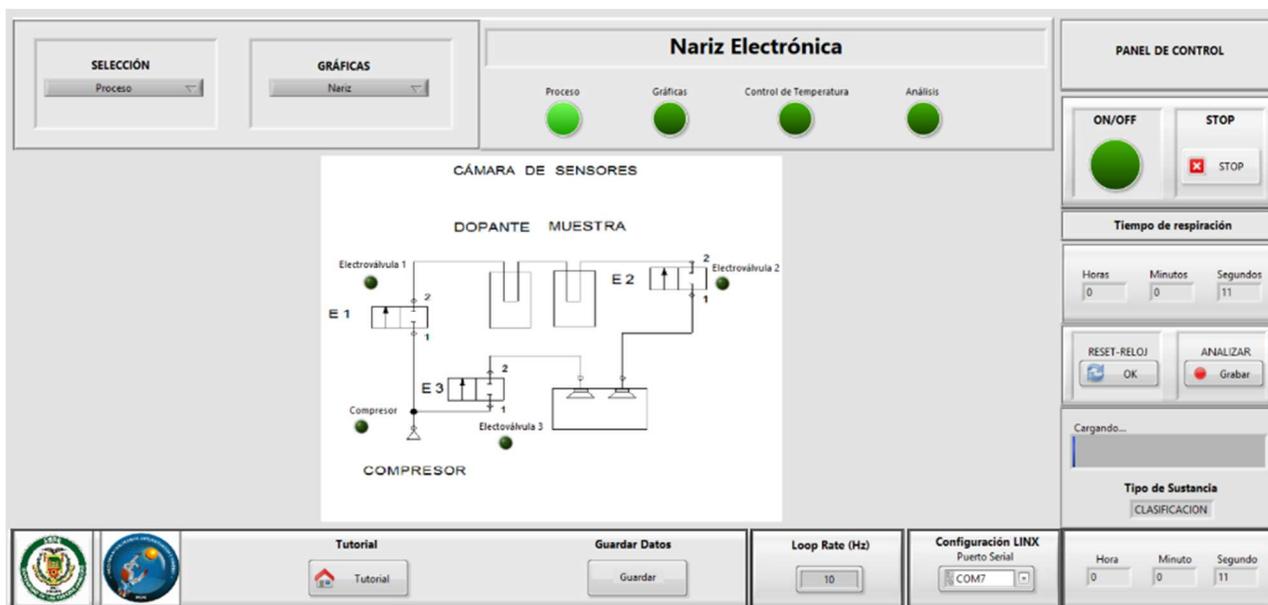


Figura 69. Pantalla de flujo de respiración

2. Pantalla de visualización de señales de los sensores de olor.

En esta pantalla se visualiza la respuesta que tienen los sensores al momento de una aspiración y limpieza del sistema, de igual manera las gráficas pueden ser vistas independientemente por cada sensor o ver la respuesta de todos los sensores al mismo tiempo.

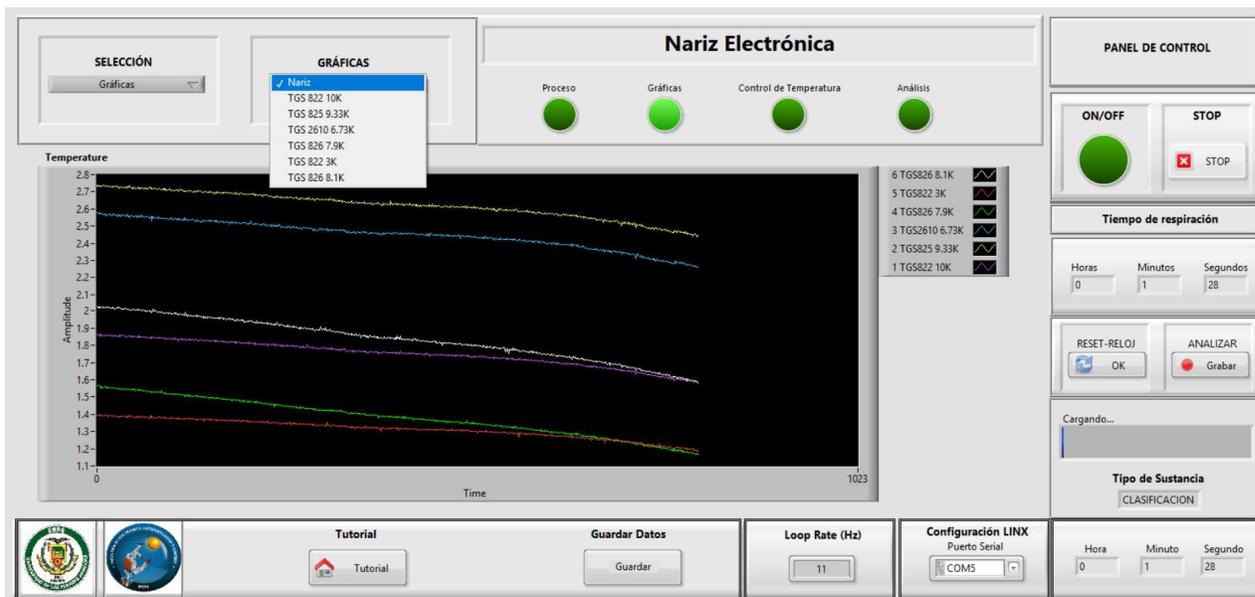


Figura 70. Pantalla de visualización de señales de la cámara de olores

3. Pantalla de control de temperatura.

Esta pantalla permite al usuario tener una visualización del funcionamiento de los parámetros principales de la planta.

- Temperatura
- SP (Set-Point)
- PV (Variable del proceso)
- MV (Variable manipulada)
- %Error
- Parámetros de la planta
- Variables del controlador
- Tipo de entrada (Escalón o Rampa)

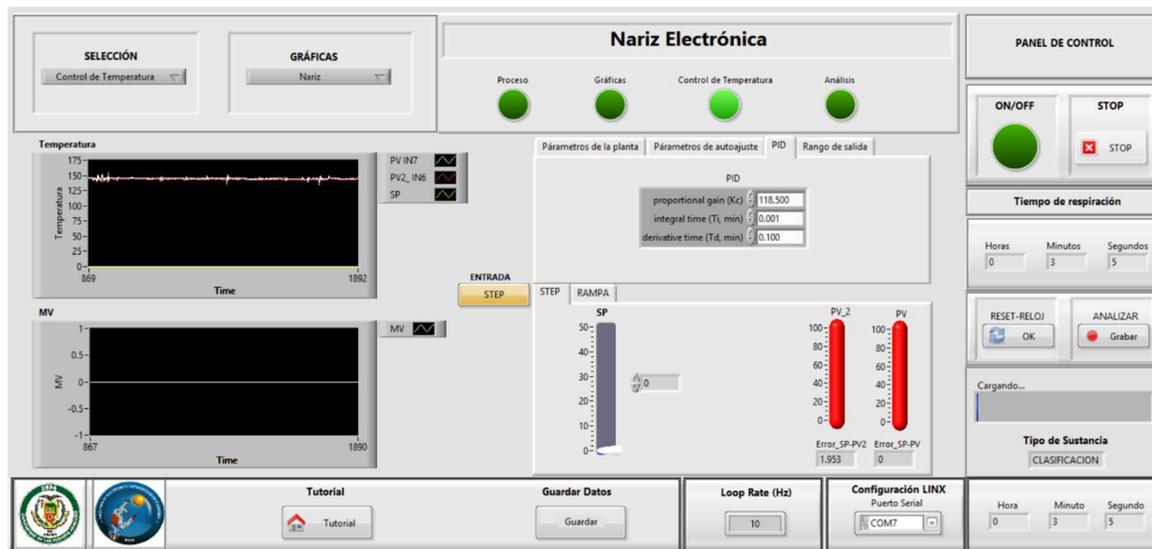


Figura 71. Pantalla de sistema de control de temperatura

4. Pantalla de análisis de la sustancia de interés.

En esta pantalla se presentará los datos tomados por los sensores de olor y temperatura, además se mostrará la concentración de las sustancias explosivas analizadas.

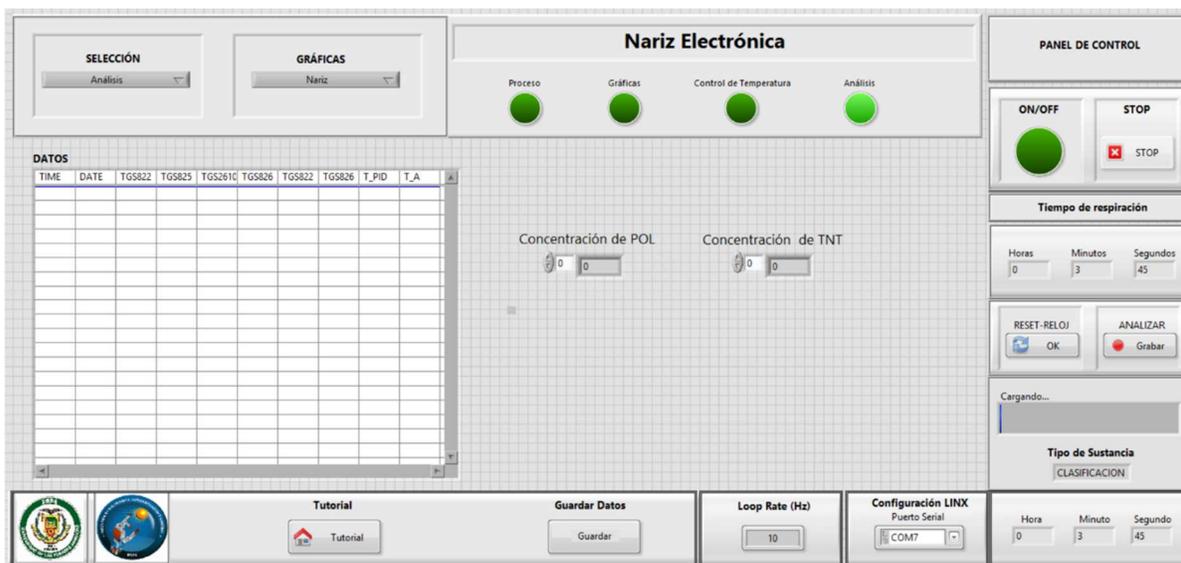


Figura 72. Pantalla de análisis de sustancias

3.1.2 Diagramas de programación de la nariz electrónica

Para entender cómo funciona la programación de la nariz electrónica, el diagrama de flujo del proceso se muestra en la Figura 73. El proceso de la nariz electrónica inicia con el sistema de control de temperatura para garantizar que las mediciones de la cámara de sensores sean considerados confiables, el sistema tiene la opción de elegir el tipo de entrada ya sea rampa o escalón; cuando el sistema se enciende la respiración de la nariz electrónica es de 3 [min] comenzando con una espera de 15 [s], una aspiración de 45 [s] y una limpieza de 2 [min] ante una entrada escalón y si el sistema está en una configuración de entrada tipo rampa la aspiración será constante. Además, el sistema cuenta con el análisis de sustancia en tiempo real para poder identificar el tipo de explosivo.

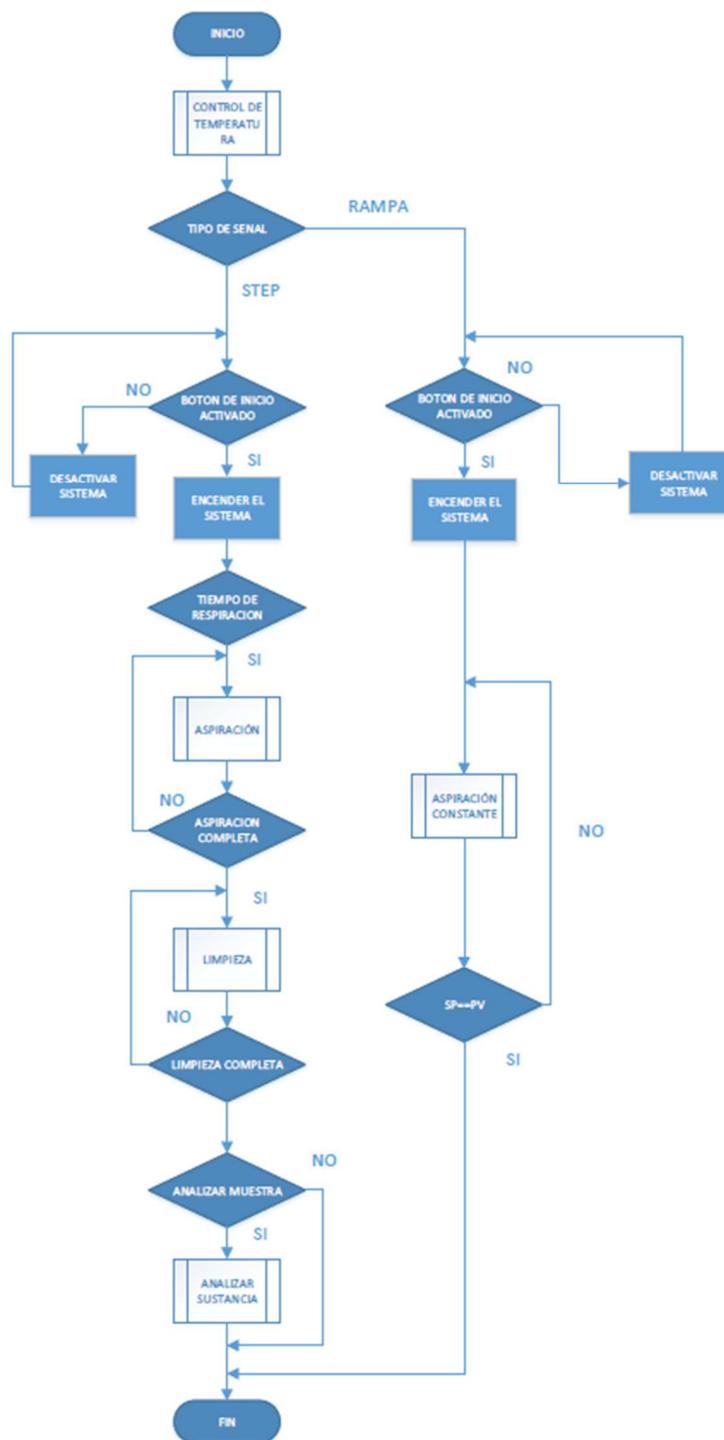
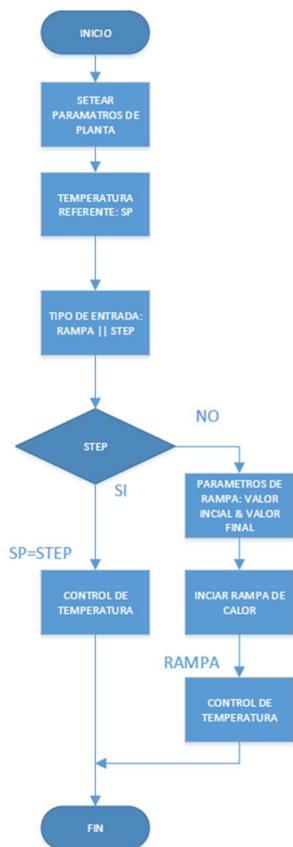


Figura 73. Diagrama de flujo de la nariz electrónica

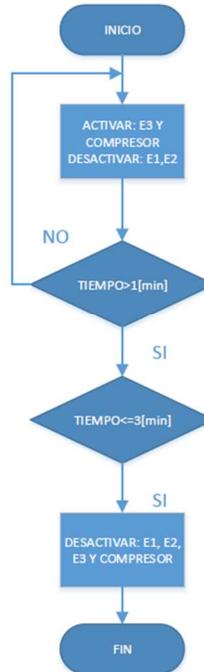
CONTROL DE TEMPERATURA



ASPIRACIÓN



LIMPIEZA



ASPIRACIÓN CONSTANTE



ANÁLISIS DE DATOS MODELO

PLS



Figura 74. Subprocesos de la nariz electrónica.

3.1.3 Programación en bloques

El entorno de LabView permite la programación en bloques y este suele venir de fondo blanco, de esta manera se realizará una circuitería interna con las funciones proporcionadas del mismo programa.

Las funciones más relevantes que proporciona la librería de LabView en la programación en bloques son:

- VI de PID Autotuning (Temperatura) el cual se encarga de controlar y ajustar directamente un sistema temperatura. Este VI utiliza el control interno del modelo para compensar el tiempo muerto y sintonizar el sistema, en la Figura 75 se encuentra la función de que proporciona LabView.

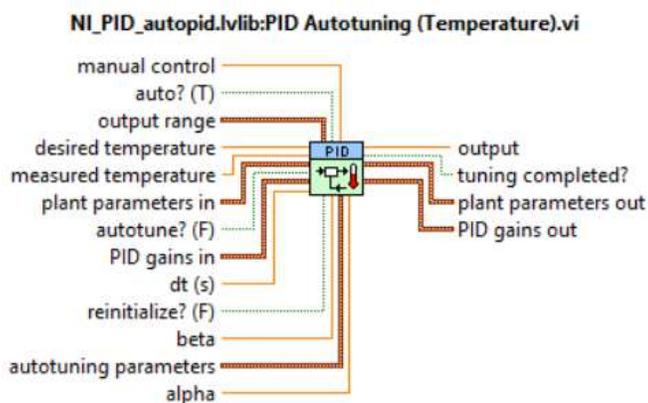


Figura 75. Vi de control de temperatura

- MathScript RT Module, este es un nodo para ejecutar los scripts de MatLab, pero con ciertas limitaciones, ya que no contiene todas las funciones de MatLab; cabe recalcar

que en la función de MathScript se realizó la programación del modelo para el análisis de sustancias explosivas.

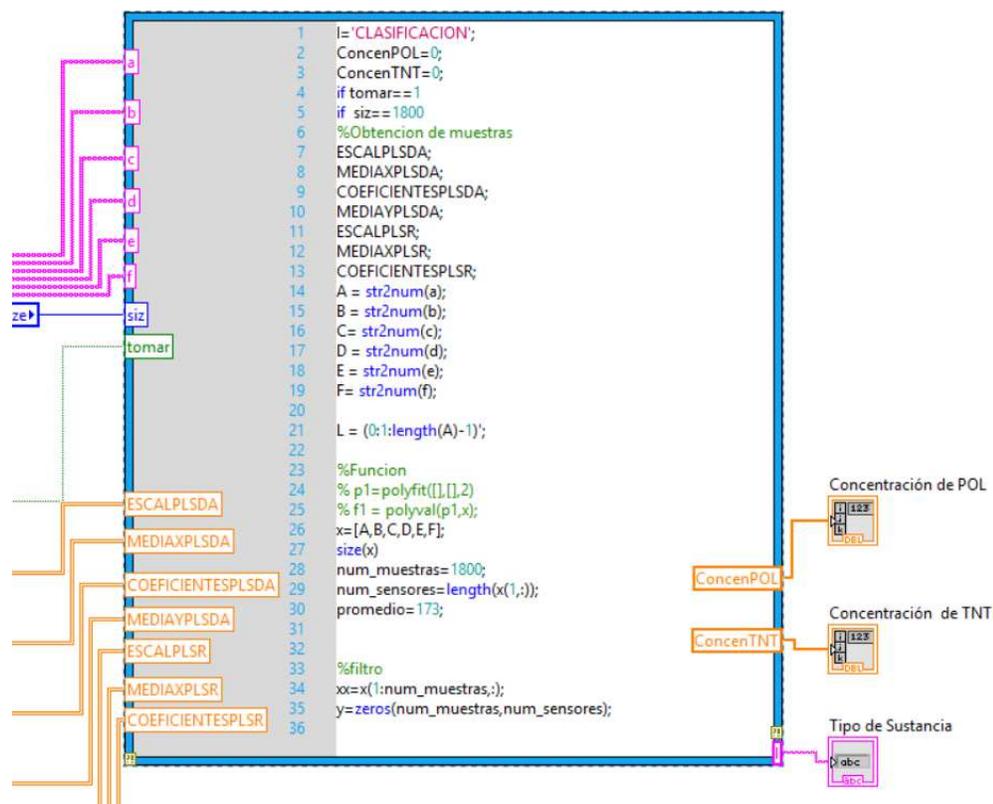


Figura 76. Vi de MathScript

3.2 Integración del Modelo de Clasificación PLS

El modelo que se escogió fue a partir del proyecto de titulación “Desarrollo de modelos multivariantes para discriminación y cuantificación de sustancias explosivas” (De la Cruz, 2019). El cual se realizó la toma de 63 experimentos de TNT, pólvora y alcohol a diferentes concentraciones de las sustancias explosivas de (3, 4, 5) gramos y a 1 mililitro de alcohol de la

nariz electrónica en óptimas condiciones; para luego entrenar estos valores y ver el modelo que más se adecúa en el análisis de la detección de la sustancia explosiva.

El modelo de “Regresión por mínimos cuadrados parciales PLS” fue escogido por obtener los mejores resultados en la predicción de las sustancias explosivas, dicho modelo estadístico es aplicable a conjuntos multivariantes y consiste en obtener de forma iterativa direcciones ortogonales en los espacios de variables (Salazar, 2018). De este modelo se generó una base de datos con extensión (.mat) que es precargada en LabView, pero el código para el análisis de sustancias fue realizado en Python de forma Off-Line y de esta manera se transcribió el código a LabView para el funcionamiento en tiempo real.

El proceso de identificación de la sustancia explosiva comienza cuando la respiración haya culminado y para poder implementar el modelo en tiempo real se procede a realizar un preprocesamiento de la señal para la mejora en relación (señal – ruido) y el procedimiento que se realizó en este trabajo para la identificación de la sustancia explosiva es:

1. Suavizar las señales
2. Eliminar la línea base
3. Concatenar las señales filtradas
4. Identificar la sustancia de interés a través del modelo PLS

La identificación de la sustancia tarda 3 [s] en analizar después de que se haya completado la respiración y en la interfaz gráfica se podrá visualizar el proceso del análisis en tiempo real, en la Figura 77 y Figura 78 se muestra el preprocesamiento de las señales de la cámara de olores.

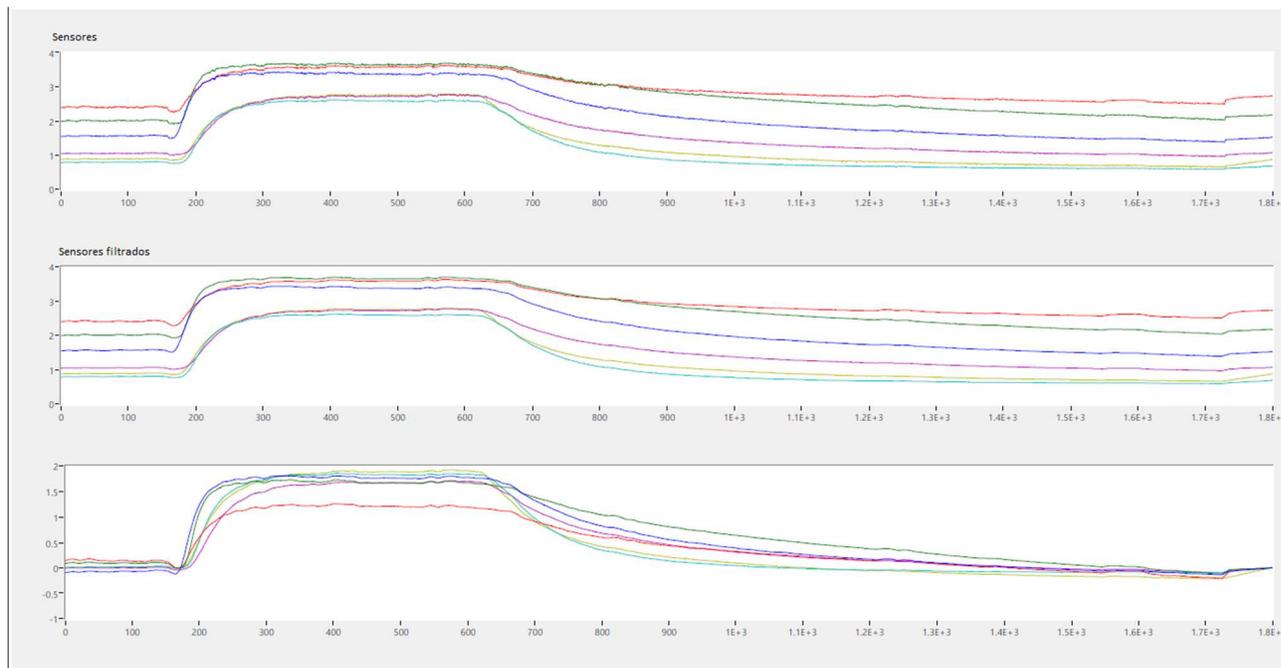


Figura 77. Captación de las señales, suavizado de las señales y eliminación de la línea base

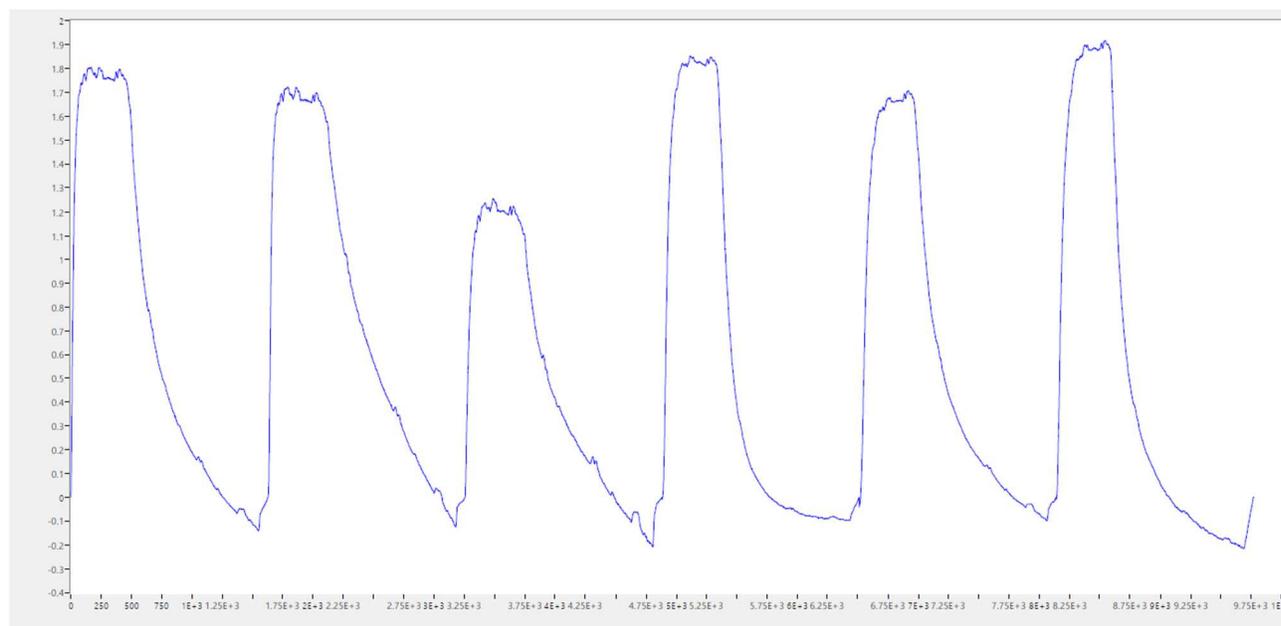


Figura 78. Concatenación de las señales filtradas

La integración del modelo se realizó por medio de la función (MathScript), dado que la programación del modelo fue realizado por De La Cruz en su proyecto de titulación por medio del software Python, pero al transcribirlo a un lenguaje acorde a la función de LabView el modelo PLS para la discriminación de sustancias explosivas si se ejecuta en tiempo real, la programación del modelo se detalla en el Anexo C;**Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo abarca la comparación de las mejoras que se realizaron del prototipo de (Vallejo & Zurita, 2017) respecto con la repotenciación de la nariz electrónica con dopaje automatizado 2016-PIC-009, además se presenta las indicaciones para el uso del dispositivo y finalmente se muestra los resultados obtenidos del modelo clasificador PLS.

4.1 Mejoras en el dispositivo

Después de realizar las mejoras en el prototipo de (Vallejo & Zurita, 2017) el tiempo de respiración fue cambiado debido que en el Capítulo I se determinó de manera gráfica que los sensores se excitan y se estabilizan en un tiempo menor a 1 minuto y el tiempo de limpieza varía con el aire que incide en el sensor de esta manera se hizo una comparación del tiempo de respiración anterior con el actual y en la Tabla 15 se muestra la comparación de tiempos de respiración y para entender todas las mejoras realizadas del prototipo antiguo con el actual en la Tabla 16 se detallan una lista de las mejoras realizadas en el prototipo.

Tabla 15

Tiempos de respiración en el dispositivo

CARACTERÍSTICA	PROTOTIPO ANTERIOR	PROTOTIPO ACTUAL
Tiempo de respiración	17 [min]	3 [min]

$$\text{minutos ahorrados} = 17 - 3 = 14 \text{ [min]}$$

Tabla 16

Comparación del prototipo antiguo con el actual

CARACTERÍSTICA	PROTOTIPO ANTIGUO	PROTOTIPO ACTUAL
Calibración del sistema de sensado	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Flujo de respiración cumpliendo con los parámetros de diseño	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Control de temperatura	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Dopaje automático	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Interfaz gráfica amigable al usuario	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Análisis de la sustancia en tiempo real	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota: Para cada ítem se seleccionará con una x lo que se haya implementado en el prototipo.

4.2 Uso del dispositivo

Para el uso de la nariz electrónica a continuación se explica paso a paso como realizar el análisis de las sustancias de interés o por medio del video tutorial se podrá indicar todos los pasos, pero de manera gráfica para su mejor comprensión.

1. Conectar el dispositivo a una toma de 110 [V] y posteriormente encender el swith de la nariz electrónica.
2. Conectar la fuente de 5 [V].
3. Conectar la tarjeta de adquisición de datos por medio del cable USB a la computadora.
4. Llenar el depósito de alcohol.
5. Llenar el primer vial con 1 [ml] de alcohol.
6. Llenar el segundo vial con la sustancia a ser analizada.
7. Abrir el archivo de LabView donde se encuentra la programación del sistema.

8. Pulsa el botón de Ejecución Continua del sistema.
9. Poner la temperatura de referencia a la cual quiera ser controlada.
10. Encender el sistema por medio del botón ON/OFF.
11. Reiniciar el cronometro de Tiempo de Respiración y pulsar el botón de Analizar.
12. Cuando culmine el tiempo de respiración se analizará el tipo de sustancia y el grado de concentración.
13. Pulsar nuevamente el botón de Analizar para que se detenga el proceso de análisis ya que el sistema consume muchos recursos y la vuelve lenta.
14. Si se desea el análisis de una nueva sustancia pulsar el botón STOP y además cambiar el segundo vial a la nueva sustancia a ser analizada y retornar al punto 10.
15. Si desea parar el sistema pulsar el botón de Ejecución Continua y pulsar el botón de STOP para terminar el proceso.

Cabe recalcar que la identificación de la sustancia tarda 3 segundos en analizar después de que se haya completado los 3 minutos de respiración.

4.3 Discriminación de sustancias explosivas de no explosivas

Para la clasificación de las sustancias se realizaron 20 experimentos en tiempo real a una temperatura de 35°C para poder determinar la tasa de clasificación de las sustancias explosivas, en la Tabla 17 se detalla el tiempo, el tipo de sustancias y la detección tanto cuantitativa como cualitativamente.

Tabla 17
Análisis de sustancias explosivas

ITEM	FECHA	TIEMPO	SUSTANCIA	CANTIDAD gramos mililitros	DETECCIÓN			
					CUALITATIVA	ACIERTOS	CUANTITATIVA	
					IVA	OS	POL	TNT
1	11/28/2019	10:51 AM	ALCOHOL	1	ALCHOL	SI	-1.29	0.47
2	11/28/2019	11:02 AM	POL	5	TNT	NO	2.89	-0.04
3	11/29/2019	11:11 AM	TNT	3	TNT	SI	0.27	1.97
4	11/28/2019	11:46 AM	POL	3	POL	SI	18.42	-5.59
5	11/28/2019	11:52 AM	TNT	4	TNT	SI	17.43	-6.74
6	11/29/2019	11:58 AM	TNT	4	TNT	SI	21.58	-6.35
7	11/28/2019	12:04 PM	ALCOHOL	1	TNT	NO	19.31	-6.33
8	11/28/2019	12:10 PM	POL	4	TNT	NO	14.45	-4.19
9	11/29/2019	12:15 PM	TNT	5	TNT	SI	19.39	-6.08
10	11/28/2019	12:21 PM	POL	5	TNT	NO	13.21	-3.24
11	11/28/2019	12:33 PM	ALCOHOL	1	ALCOHOL	SI	0.27	-0.58
12	11/29/2019	12:44 PM	POL	3	ALCOHOL	NO	0.04	0.85
13	11/28/2019	12:50 PM	TNT	3	TNT	SI	4.32	-0.57
14	11/28/2019	2:52 PM	ALCOHOL	1	ALCOHOL	SI	-3.67	2.42
15	11/29/2019	3:11 PM	TNT	5	POL	NO	5.45	-1.28
16	11/28/2019	3:16 PM	POL	3	TNT	NO	1.34	0.07
17	11/28/2019	3:20 PM	TNT	4	ALCOHOL	NO	1.29	1.27
18	11/29/2019	3:25 PM	POL	4	ALCOHOL	NO	1.56	1.01
19	11/28/2019	3:31 PM	TNT	5	TNT	SI	0.91	1.43
20	11/28/2019	3:40 PM	ALCOHOL	1	ALCHOL	SI	0.85	0.81

Para calcular la tasa de clasificación de las tres clases, se toma las sustancias que fueron correctas con el número total de experimentos.

$$\%Tasa_{clasificacion} = \frac{\# \text{ aciertos correctos}}{\# \text{ total de experimentos}} \times 100$$

$$\%Tasa_{clasificacion} = \frac{11}{20} \times 100 = 55\%$$

Además, se calcula el porcentaje de aciertos de las sustancias explosivas.

$$\%Tasa_{explosivos} = \frac{\# \text{aciertos de sustancias explosivas}}{\# \text{total de experimentos con explosivos}} \times 100$$

$$\%Tasa_{explosivos} = \frac{13}{15} \times 100 = 86.66\%$$

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la nariz electrónica tiene un grado de acierto del tipo de sustancia del 55%, es decir que 5 de cada 10 sustancias analizadas son correctas y ante una amenaza de un explosivo el grado de acierto de la nariz electrónica es de 86.66%, es decir que 8 de cada 10 clasificaciones son correctas.

Tabla 18
Porcentaje de error del análisis cuantitativo

ITEM	FECHA		SUSTANCIA	CANTIDAD	CUANTITATIVA		%Error en POL	%Error en TNT
					POL	TNT		
1	11/28/2019	11:02 AM	POL	5	2.89	-0.04	42.2	100.8
2	11/28/2019	12:21 PM	POL	5	13.2 1	-3.24	164.2	164.8
3	11/29/2019	11:11 AM	TNT	3	0.27	1.97	91	34.33
4	11/28/2019	12:50 PM	TNT	3	4.32	-0.57	44	119
5	11/28/2019	11:46 AM	POL	3	18.4 2	-5.59	514	286.33
6	11/29/2019	12:44 PM	POL	3	0.04	0.85	98.66	71.67
7	11/28/2019	3:16 PM	POL	3	1.34	0.07	55.33	97.67
8	11/28/2019	11:52 AM	TNT	4	17.4 3	-6.74	335.75	268.5
9	11/29/2019	11:58 AM	TNT	4	21.5 8	-6.35	439.5	258.75

10	11/28/20 19	3:20 PM	TNT	4	1.29	1.27	67.75	68.25	
11	11/28/20 19	12:10 PM	POL	4	14.4 5	-4.19	261.25	204.75	
12	11/29/20 19	3:25 PM	POL	4	1.56	1.01	61	74.75	
13	11/29/20 19	12:15 PM	TNT	5	19.3 9	-6.08	287.8	221.6	
14	11/28/20 19	3:31 PM	TNT	5	0.91	1.43	81.8	71.4	
15	11/29/20 19	3:11 PM	TNT	5	5.45	-1.28	9	125.6	
							% Total de error	170.22	144.55

De la Tabla 18 se puede estimar el error total cuantitativo de acuerdo a la ecuación (7).

$$\%Error_{total} = \frac{\%Error\ en\ Pol + \%Error\ en\ TNT}{2} \quad (7)$$

$$\%Error_{total} = \frac{170.22 + 144.55}{2} = 157.38\%$$

Se puede concluir que en este trabajo el resultado cuantitativo del análisis de sustancias es malo ya que tiene un error del 157.8%, sin embargo, la programación del prototipo es escalable de tal manera que si se cambian las bases de datos del modelo clasificador o si se desarrolla un nuevo modelo clasificar en MathScript el error de predicción cuantitativa se reduciría y aumentaría el número de aciertos en la clasificación cualitativa de sustancias.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se repotencio la nariz electrónica con dopaje automatizado, al aplicar las debidas correcciones al prototipo anterior donde se mejoró las señales de la matriz de sensado químico, la corrección del flujo de aire, de un nuevo diseño de control de temperatura y al agregar un dopaje automatizado de alcohol cuando este analiza varias sustancias en un tiempo prolongado para así lograr mejorar el sistema de instrumentación y control, además se diseñó una interfaz gráfica amigable al usuario para la visualización de la señales del prototipo y de la integración un modelo clasificador de sustancias explosivas de no explosivas en tiempo real.
- Se identificó que las señales erróneas del sistema de sensado químico era producto de las fallas provocadas de la tarjeta PCB y de ciertos componentes dañados, pero al reemplazar y recalibrar cada sensor se logró restaurar las señales de la cámara de sensores.
- Se diseño e implementó un flujómetro para comprobar el flujo de aire que circula por el sistema neumático de la nariz electrónica que era de 0.2 *lpm* lo cual no cumplía con las especificaciones de diseño, pero al realizar ciertas modificaciones en el vial del dopante de alcohol, el flujo de aire aumentó a 1.1 *lpm* a la cámara de sensores cumpliendo con las especificaciones del diseño de flujo.

- Se incluyó un control de dopante de alcohol cuando el prototipo analiza varias sustancias en el transcurso de cada hora este repondrá 0.1 ml de alcohol al dopante.
- Se implementó un nuevo sistema de control de temperatura necesario para poder disminuir los efectos ambientales ya que perjudican la sensibilidad de los sensores, además se probó el desempeño ante una entrada rampa dando un error en estado estacionario del 1.47% y una estabilización del sistema en 10 minutos.
- Se implementó una interfaz gráfica con referencia a la guía GEDIS para mejorar la visibilidad y la comprensión intuitiva del usuario.
- Se mejoró el sistema de aspiración y limpieza del sistema de los sensores químicos de la nariz electrónica reduciendo el tiempo de 17 minutos a 3 minutos de tal manera que el análisis de la sustancia de interés será más rápido y que la identificación de la sustancia sea de 3 segundos.
- Se implementó un modelo clasificar en tiempo real, se puede concluir que la tasa de clasificación de sustancias entre alcohol, TNT y pólvora del 55%. Y un valor de clasificación de sustancias explosivas de no explosivas del 86.66%.

5.2 Recomendaciones

- El resultado cuantitativo del análisis de sustancias tiene un error del 157.8%, el cual es un error muy elevado, sin embargo, el prototipo cuenta con este análisis, pero si se mejorara en un futuro el modelo de discriminación, el error de predicción cuantitativa se reduciría.

- Se recomienda al usuario que si no tiene una clara idea de cómo funciona la interfaz gráfica, vea el video tutorial o en el Capítulo IV se encuentra los pasos a seguir para el uso del dispositivo.
- Se recomienda que la tarjeta PCB actual sea cambiada y que cuente con una entrada única de alimentación para los Heather, además que se incluya de manera estratégica un sensor de temperatura en la placa ya que la mayoría de narices debe tener un control de temperatura óptimo para reducir los efectos que perjudican la sensibilidad de los sensores.
- Se recomienda que los actuadores del control de temperatura sean cambiados para lograr reducir la estabilización del sistema ya que actualmente el sistema cuenta con resistencias de potencia y en determinado punto este mantiene su calor generando un sobrepico al sistema y de alguna manera cambia la respuesta en los sensores.

REFERENCIAS

- Arias, B. (2017). *Desarrollo e implementación de algoritmos de localización de fuentes de olor en un sistema robótico*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Bacharach: Pioneers in Combustion Analysis. (n.d.). Recuperado el 4 de abril de 2019 de <https://www.mybacharach.com/history/>
- Beltrán, A. (2013). *Design and implementation of a spirometer*. 10(2), 5–14. Recuperado de <http://editorial.udistrital.edu.co/contenido/c-778.pdf>
- Branco, M., León, M., Novo, A., & Otero, A. (2005). Software libre. Implantación de sistemas. In *Science*.
- De la Cruz, K. (2019). *Desarrollo de modelos multivariantes para discriminación y cuantificación de sustancias explosivas*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Espinosa, A., & Venegas, C. (2017). *Optimización e integración de una nariz electrónica autónoma embebida en un sistema robótico para la identificación de sustancias explosivas como TNT y pólvora base doble en ambientes controlados*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Figaro Engineering Inc. (2004a). TGS 825 - Special Sensor for Hydrogen Gas. *Sensors (Peterborough)*, 2. Recuperado de https://www.soselectronic.com/a_info/resource/c/figaro/tgs825.pdf

Figaro Engineering Inc. (2004b). TGS 825 - Special Sensor for Hydrogen Gas. *Sensors (Peterborough, NH)*, 2.

Figaro Engineering Inc. (2014). TGS 826 - Ammonia Sensor - MOX sensor. *Product Information*. Recuperado de <http://www.figarosensor.com/products/826pdf.pdf>

Gardner, J., & Bartlett, P. (2000). Electronic Noses. Principles and Applications. *Measurement Science and Technology*, 11(7), 1087. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/7/702>

Giancoli, D. (2006). *Física: principios con aplicaciones* (sexta edic). Mexico: Pearson/Prentice Hall.

Harris, D. (2007). *Engineering psychology and cognitive ergonomics : 7th international conference, EPCE 2007, held as part of HCI International 2007, Beijing, China, July 22-27, 2007 : proceedings*. Springer.

Khazan, A. (1994). *Transducers and their elements : design and application*. Recuperado de <http://www.worldcat.org/title/transducers-and-their-elements-design-and-application/oclc/28221712>

Lexis. (2009). *Ley sobre armas, municiones, explosivos y accesorios*.

López, I. (2016). *Desarrollo de un prototipo electrónico de sensado químico, para la detección de trinitrotolueno (TNT) y pólvora base doble en un ambiente controlador*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Ltd., I. T. P. (n.d.). Practical Process Control for Engineers and Technicians. Recuperado el 11 de noviembre de 2019 de <https://www.eit.edu.au/cms/resources/books/practical-process-control-for-engineers-and-technicians>

Lucerna, P. (2004). *Transductores de presión y de flujo*.

Motorola. (2008). MPX10DP- Diferencial Presion Sensor. *Product Information*, 2007–2008.

Mott, R. (2006). *Mecanica de Fluidos* (6ta ed.). Mexico: Pearson/Prentice Hall.

Ogata, K. (2013). Ingeniería de Control Moderna. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Persaud, K., & Dodd, G. (1982). Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose. *Nature*, 299(5881), 352–355. <https://doi.org/10.1038/299352a0>

Requena, A., & Tomás, L. (2008). *Tríadas nuevas lecturas en ciencia y tecnología*. Netbiblo.

Salazar, J. (2018). *Creación de un modelo de calibración multivariante para determinar el límite de detección de un prototipo nariz electrónica para medición de sustancias explosivas*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Vallejo, Z., & Zurita, D. (2017). *Diseño e implementación de un sistemas mecatrónico portable con dopaje automático para detección de muestras explosivas*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

ANEXOS