



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

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

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

**TEMA: “OPTIMIZACIÓN E INTEGRACIÓN DE UNA NARÍZ
ELECTRÓNICA AUTÓNOMA EMBEBIDA EN UN SISTEMA
ROBÓTICO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUSTANCIAS
EXPLOSIVAS COMO TNT Y PÓLVORA BASE DOBLE EN
AMBIENTES CONTROLADOS”**

AUTORES:

**ALEJANDRO ESPINOSA, CARLOS ENRIQUE
VENEGAS VILLACIS, CARLOS LUIS**

DIRECTORA: ING. GUAMÁN, ANA PhD

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“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”*, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores *ALEJANDRO ESPINOSA CARLOS ENRIQUE* y *VENEGAS VILLACIS CARLOS LUIS* para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 28 de junio del 2017

ING. ANA GUAMÁN PhD

DIRECTORA



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **ALEJANDRO ESPINOSA CARLOS ENRIQUE**, con cédula de identidad N° 1103616734 y **VENEGAS VILLACIS CARLOS LUIS**, con cédula de identidad N° 1720237005, declaramos que este trabajo de titulación **“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”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

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

Sangolquí, 28 de junio del 2017

Alejandro Espinosa Carlos Enrique
C.C 1103616734

Venegas Villacis Carlos Luis
C.C 1720237005



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **ALEJANDRO ESPINOSA CARLOS ENRIQUE** y **VENEGAS VILLACIS CARLOS LUIS**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“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”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 28 de junio del 2017

Alejandro Espinosa Carlos Enrique
C.C 1103616734

Venegas Villacis Carlos Luis
C.C 1720237005

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por darme las fuerzas necesarias para cumplir con una meta más en mi vida.

A mis padres, por saberme guiar por el buen camino brindándome su amor infinito y su apoyo incondicional. Por haberme enseñado que cada meta fijada hay que conseguirla en base al esfuerzo, sacrificio y dedicación.

A mis hermanas, por demostrarme su cariño y afecto en todo momento, y por cuidar de mi a pesar de la distancia.

Carlos E. Alejandro E.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por permitir que gente que amo me siga acompañando en todos mis éxitos y fracasos.

A mis padres, Olga y Luis, que con su ejemplo de perseverancia, responsabilidad y tenacidad me han formado para no doblegarme frente a las adversidades, por su amor y comprensión.

A Carmencita, la mejor amiga de mi madre, a quien de corazón también considero mi mamá, admiro mucho su gentileza y buen corazón.

A mi hermano Erick, que a su manera siempre ha sabido protegerme, estoy tan orgulloso de él, así como lo está de mí.

A mis sobrinos Ariel y Gabriel que son mi motivación para mejorar siempre.

A Max, mi mascota que me acompañó durante todas las noches de estudio y ya no está conmigo.

Carlos L. Venegas V.

AGRADECIMIENTO

A nuestro creador, por darme la fortaleza y sabiduría especial durante estos siete años de estudio para conseguir la anhelada ingeniería.

A mis padres, que han sido el pilar fundamental en mi realización como profesional y persona, por enseñarme los valores y principios que hoy en día rigen mi vida.

A mis hermanas, A Mónica por ser mi primera amiga y enseñarme que la distancia no es impedimento para cuidar de mí. A Karla que con sus ocurrencias llenan de alegría mi vida incluso en los peores momentos.

A María José, por ser la mujer que ha sabido cautivar mi corazón, por ser la persona con quien puedo confiar y contar en los buenos y malos momentos.

A mis familiares, amigos y compañero de Tesis, que han brindado su apoyo y hombro para conseguir la meta establecida, gracias por compartir conmigo innumerables anécdotas.

A mis profesores de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", por compartir todos sus conocimientos día tras día para hacer de mí un buen profesional y saber desempeñarme de lo mejor en esta carrera tan laboriosa.

Al Ejército por brindarme la oportunidad de continuar con mi desarrollo profesional y personal, para servir con gran esmero a la institución y contribuir a la vez con el engrandecimiento del país.

A la Ing. Ana Guamán y a su esposo, por compartir sus conocimientos y saber orientarnos de la mejor manera durante la realización del presente proyecto. Adicional, deseándole lo mejor de los éxitos en su nueva etapa de ser Mamá.

Carlos E. Alejandro E.

AGRADECIMIENTO

A nuestro creador, por brindarme la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa institución, y otorgarme buenas oportunidades de superación personal y profesional.

A mis padres, que han sido mi mayor apoyo y fuerza durante los 6 años de etapa universitaria y en toda mi vida, a ti madre que cuando estuve a punto de rendirme en primer semestre me retaste a ser mejor.

A mi hermano y sobrinos que a pesar de estar contrariado siempre me han sabido sacar una sonrisa, son la razón de superarme, espero algún momento ser un modelo a seguir para ustedes.

A mis familiares que siempre han brindado su apoyo para conseguir las metas establecidas, siempre teniendo altas expectativas.

A Camila por los hermosos momentos que hemos pasado juntos y su apoyo cuando he estado a punto de tirar la toalla.

A mis amigos de la Universidad y de la vida que ante todo siempre me han demostrado que he tenido la suerte de siempre conocer gente de bien que lucha por sus sueños al igual que yo.

A mi compañero de tesis que a lo largo del desarrollo de todo este proyecto se ha convertido en un gran amigo, además de comprender distintas ocupaciones que nos retrasaron.

A mis profesores de las Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", por compartir todos sus conocimientos día tras día y ante todo agradecer por sus correctos consejos sobre la vida que han sido útiles en mi diario vivir, con muchos de ellos he forjado un gran lazo de amistad.

A la Ing. Anita Guamán y a su esposo, por asesorar con paciencia y siempre de la mejor manera nuestro proyecto de titulación, es bueno saber que la Universidad de las Fuerzas Armadas cuenta con docentes que además de excelencia profesional tienen una alta calidez humana, de seguro esta gran cualidad se verá reflejado en su nueva etapa de ser Mamá.

Carlos L. Venegas V.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
AGRADECIMIENTO	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e importancia	3
1.3. Alcance.....	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	8
1.5. Descripción del proyecto.....	8
CAPÍTULO 2 NARICES ELECTRÓNICAS	11
2.1. Narices electrónicas	11
2.1.1. Origen y aplicaciones de la nariz electrónica	12
2.2. Comparación de la nariz electrónica con el sistema olfativo humano.....	13
2.3. Nariz electrónica en aplicaciones para la detección de explosivos	15
2.4. Narices electrónicas como sistemas portables.....	16
CAPÍTULO 3 OPTIMIZACIÓN DEL PROTOTIPO DE NARIZ ELECTRÓNICA	18
3.1. Análisis del prototipo inicial de nariz electrónica	18
3.2. Optimización del bloque de medición.....	20
3.2.1. Selección de sensores	20
3.2.2. Diseño y elaboración de PCBs para la matriz de sensores.....	22
3.2.3. Cámara de sensores	27

3.3. Optimización bloque neumático	29
3.3.1. Diseño experimental usando método “Diseño Factorial 2^k ”	31
3.3.2. Sistema neumático final	50
3.4. Optimización bloque de adquisición y procesamiento de datos	51
3.4.1. Selección de tarjeta de desarrollo	53
CAPÍTULO 4 PROCESADO DE SEÑAL EN TIEMPO REAL.....	57
4.1. Software del prototipo inicial	57
4.2. Adquisición de las señales.....	58
4.3. Preprocesamiento de las señales	61
4.3.1. Suavizado de la señal	61
4.3.2. Estimación y eliminación de la línea base.....	62
4.3.3. Concatenamiento y alineación	65
4.4. Modelo de discriminación de sustancias.....	66
4.4.1. Análisis de componentes principales (PCA)	67
4.4.2. Análisis discriminante lineal (LDA)	68
4.4.3. Generación del modelo.....	69
4.5. Embeber los algoritmos de procesamiento.....	73
4.6. Almacenamiento de datos	76
CAPÍTULO 5 MONTAJE Y NAVEGACIÓN EN EL SISTEMA ROBÓTICO	78
5.1. Montaje y acondicionamiento de la plataforma robótica con la nariz electrónica	78
5.1.1. Acondicionamiento de la etapa de potencia y control	81
5.1.2. Acondicionamiento de los bloques de la nariz electrónica	84
5.2. Comunicación con la nariz electrónica	85
5.3. Navegación del sistema robótico	86
5.3.1. Descripción del ambiente controlado.....	87
5.3.2. Implementación de navegación asistida.....	89
CAPÍTULO 6 PRUEBAS Y RESULTADOS	96
6.1. Resultados de las pruebas de funcionamiento	101
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
7.1. Conclusiones.....	106
7.2. Recomendaciones	107
BIBLIOGRAFÍA	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Acciones realizadas en control de armas, municiones y explosivos.....	4
Tabla 2	Distribución de los pines del sensor TGS 822 y TGS 2610	22
Tabla 3	Distribución de “Bornes” e "Interconexión" de PCB inferior	24
Tabla 4	Distribución de "Interconexión" de PCB superior	26
Tabla 5	Lista de componentes de PCBs.....	27
Tabla 6	Componentes del bloque neumático	31
Tabla 7	Identificación y especificaciones de los factores	33
Tabla 8	Matriz experimental general con niveles de los factores	34
Tabla 9	Planificación para la realización de experimentos	35
Tabla 10	Experimento de la nariz electrónica para Pólvora Base Doble y TNT	37
Tabla 11	Estimaciones de los efectos de los factores y suma de cuadrados del parámetro Y1 de Pólvora Base Doble	40
Tabla 12	Estimaciones de los efectos de los factores y suma de cuadrados del parámetro Y3 de TNT	41
Tabla 13	Estimaciones de los efectos principales e interacciones dobles de los parámetros Y1 y Y3	42
Tabla 14	Análisis de varianza del parámetro Y1.....	46
Tabla 15	Análisis de varianza del parámetro Y3.....	48
Tabla 16	Selección del nivel de cada factor para nariz electrónica.....	50
Tabla 17	Características de SBC y MCU.....	52
Tabla 18	Análisis comparativo tarjetas de desarrollo microcontroladas	53
Tabla 19	Análisis comparativo técnico de distintas tarjetas microprocesadas.....	55
Tabla 20	Librerías usadas para embeber los algoritmos de procesamiento	74
Tabla 21	Acondicionamiento del robot “Dagu Wild Thumper 6WD”	79
Tabla 22	Acondicionamiento de la nariz electrónica en el robot móvil	80
Tabla 23	Planificación de las pruebas de funcionamiento	97
Tabla 24	Resultado de las pruebas de funcionamiento	102
Tabla 25	Matriz de confusión sobre la clasificación de sustancias de interés establecidas	103
Tabla 26	Matriz de confusión sobre la clasificación en sustancias explosivas y no explosivas.....	104
Tabla 27	Resultados de la sustancia a detectar.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Matriz de sensores integrada al robot	5
Figura 2. Diagrama de bloques del prototipo de nariz electrónica.....	5
Figura 3. Prototipo en un ambiente controlado con sistema embebido	7
Figura 4. Proceso olfativo al percibir aroma.....	14
Figura 5. La nariz electrónica y el sistema del olfato humano.....	14
Figura 6. Circuito instrumentación TGS 2610 y TGS 822	22
Figura 7. Ubicación de las matrices de sensores	23
Figura 8. Diagrama esquemático PCB inferior	24
Figura 9. Diseño y visualización 3D de PCB inferior	25
Figura 10. Diagrama esquemático PCB superior	25
Figura 11. Diseño y visualización 3D de PCB superior	26
Figura 12. PCBs elaboradas y acopladas	27
Figura 13. Esquema de la cámara de sensores	28
Figura 14. Cámara de sensores.....	29
Figura 15. Cámara de sensores acoplado los circuitos PCBs.....	29
Figura 16. Diagrama neumático del prototipo de nariz electrónica para diseño de experimentos.....	30
Figura 17. Promedio de la señal con puntos mínimos y máximos del exp. 32	37
Figura 18. Gráfica de Probabilidad Normal y diagrama de Pareto de Y1	43
Figura 19. Gráfica de Probabilidad Normal y diagrama de Pareto de Y3	44
Figura 20. Gráfica de efectos principales e interacción para Y1.....	47
Figura 21. Gráfica de efectos principales e interacción para Y3.....	49
Figura 22. Diagrama neumático final de la nariz electrónica	51
Figura 23. Tarjeta Arduino DUE.....	54
Figura 24. Tarjeta Raspberry PI3	55
Figura 25. Diagrama de bloques de procesamiento de nariz electrónica.....	56
Figura 26. Diagrama de flujo tarjeta Arduino Due.....	59
Figura 27. Diagrama de flujo tarjeta Raspberry PI.....	60
Figura 28. Señal suavizada con filtro de mediana móvil	61
Figura 29. Señales de los cuatro sensores posterior a suavizado	61
Figura 30. Señales de máximos de los sensores.....	62
Figura 31. Obtención de los valores mínimos de cada sensor	63
Figura 32. Puntos máximos y mínimos en condiciones finales	64
Figura 33. Obtención de la curva de ajuste de los puntos mínimos	64
Figura 34. Eliminación de la línea base de la señal de la nariz electrónica	65
Figura 35. Respuesta de los sensores concatenados	65
Figura 36. Respuesta de sensores en varios experimentos.....	66
Figura 37. Resultado de PCA	68
Figura 38. Ejemplo de experimentación sobre las sustancias de interés	70
Figura 39. Varianza explicada de las componentes principales del PCA.....	70
Figura 40. Modelo PCA	71
Figura 41. Modelo LDA.....	71

Figura 42. Optimización del orden del clasificador de vecinos más cercanos.....	72
Figura 43. Fronteras de clasificación resultante.....	72
Figura 44. Validación del modelo	73
Figura 45. Diagrama de flujo de algoritmos embebidos.....	75
Figura 46. Tablas de la base de datos para almacenar datos.....	76
Figura 47. Esquema general dónde: (1) Batería LIPO, (2) Conversor DC-DC, (3) Driver motor DC, (4) Módulo 4 relés, (5) Switch ON/OFF, (6) Compás electrónico, (7) Arduino DUE, (8) Servomotor, (9) Arreglo de sensores químicos, (10) Sensores ultrasónicos y (11) módulo RF.....	78
Figura 48. Montaje de los elementos sobre el robot móvil.....	81
Figura 49. Regulador de voltaje LM7805.....	82
Figura 50. Elementos de la etapa de potencia.....	82
Figura 51. Elementos de la etapa de control.....	83
Figura 52. Diagrama eléctrico de conexiones al Arduino Due.....	83
Figura 53. Ubicación de los elementos de la etapa de potencia y control.....	84
Figura 54. Ubicación de los elementos del bloque de medición y neumático.....	85
Figura 55. Diagrama de red usado para la comunicación de la nariz electrónica.....	86
Figura 56. RDP de Microsoft a través de sistema operativo Windows.....	86
Figura 57. Área de experimentación (ambiente controlado).....	88
Figura 58. Objeto sospecho y viales con sustancias explosivas.....	89
Figura 59. Lógica de uso de un servidor web.....	89
Figura 60. Lógica de servidor web con websockets.....	90
Figura 61. Conexión del operador con la nariz electrónica.....	90
Figura 62. Diagrama de flujo de funcionamiento del servidor web.....	91
Figura 63. Interfaz gráfica inicial.....	92
Figura 64. Interfaz de navegación del robot.....	92
Figura 65. Controles de navegación asistida.....	93
Figura 66. Sección de experimentación.....	94
Figura 67. Posición inicial del robot móvil.....	96
Figura 68. Pantalla inicial de la aplicación web e-Nose.....	98
Figura 69. Pantalla de navegación de la aplicación web e-Nose.....	98
Figura 70. Navegación del robot hacia objeto sospechoso.....	99
Figura 71. Pantalla emergente con resultado del experimento.....	100
Figura 72. Pantalla de navegación con cuadro de resultados.....	101

RESUMEN

El presente trabajo de titulación propone una alternativa para la detección de TNT y pólvora base doble, mediante la utilización de una cámara de sensores químicos denominada nariz electrónica, esta permite aislar a los sensores de las condiciones ambientales circundantes para evitar que afecten a las mediciones, haciendo uso de cuatro sensores (2 TGS 822 y 2 TGS 22610), dos bombas neumáticas para el ingreso y salida de flujo de aire y un bloque de adquisición de datos. Para determinar los parámetros de trabajo de la nariz electrónica se realizó un diseño experimental que permitió establecer el tiempo de limpieza (180 [s]), el tiempo de respiración (3 [s]), la cantidad de sustancia explosiva (0,5 [g]), la cantidad de alcohol (0,2 [ml]) y la temperatura (ambiente). La nariz electrónica se implementó sobre una plataforma móvil que cuenta con una cámara web que permite localizar y navegar hacia los objetos sospechosos que poseen sustancias explosivas. La clasificación de las sustancias es de manera autónoma, es decir todo el preprocesamiento de las señales y el modelo de discriminación fueron embebidos en la Raspberry PI, para ello se usó un compendio de librerías Anaconda para Python. Para obtener el modelo de discriminación se realizaron un total de 154 experimentos, 64 se usaron para la generación del modelo y 90 para su validación. Se realizó 30 pruebas de funcionamiento cada una con 3 experimentos que mediante una aplicación web se realizó el control de la navegación del robot de forma asistida, de un total de 90 experimentos se obtuvo una tasa de clasificación de 58,88% al discriminar entre tres sustancias (TNT, Pólvora base doble y alcohol) y un 43,33% de detección de la sustancia establecida para cada prueba experimental. Además, posee una efectividad de 80% para clasificar sustancias explosivas de las no explosivas.

PALABRAS CLAVES:

- **NARÍZ ELECTRÓNICA**
- **PCA**
- **LDA**
- **SUSTANCIAS EXPLOSIVAS**

ABSTRACT

The present titling work proposes an alternative for TNT and double base gunpowder detection, using an array of chemical sensors called electronic nose. With the use of a sensing chamber allows to isolate the sensors from the surrounding environmental conditions to prevent them from affecting measurements. The electronic nose consists of four sensors (2 TGS 822 and 2 TGS 22610), two air pumps for air inlet and outlet and one data acquisition block. To determine the electronic nose working parameters, an experimental design was used to establish the cleaning time (180 [s]), the breathing time (3 [s]), the amount of explosive substance (0,5 [g]), the amount of alcohol (0,2 [ml]) and temperature (ambient). The electronic nose was implemented on a mobile platform that had a web camera for locating and navigates towards the suspicious objects that possess explosive substances. The classification of substances was autonomous, meaning, all signal pre-processing, and model discrimination was embedded in a Raspberry PI using a compendium of Anaconda libraries for Python. To obtain the discrimination model, a total of 154 experiments were performed, 64 were used for model generation and 90 for its validation. We performed 30 functional tests each with 3 experiments that by means of a web application the control of the navigation of the robot was carried out of assisted form, from a total of 90 experiments a classification rate of 58.88% was obtained by discriminating between three Substances (TNT, double base Powder and alcohol) and 43.33% detection of the established substance for each experimental test. In addition, it has an effectiveness of 80% to classify explosive substances of the non-explosive.

KEYWORDS:

- **ELECTRONIC NOSE**
- **PCA**
- **LDA**
- **EXPLOSIVE SUBSTANCES**

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En el Ecuador, el Ministerio de Defensa Nacional, a través de la Dirección de Control de Armas del Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas, vigila la importación, exportación, comercialización, almacenamiento, comercio interior y fabricación de armas de fuego, municiones, fuegos de artificio, pólvoras o toda clase de explosivos, así como las materias primas para su fabricación. Además, controla los medios de inflamación como: guías para minas fulminantes y detonadores; productos y elementos de uso en guerras químicas o adaptables a las mismas, (Ministerio de Defensa Nacional, 2017).

Un explosivo es una sustancia química que bajo la acción de un estímulo externo genera una gran cantidad de energía, gases, presión y temperaturas muy elevadas, en un tiempo muy corto (Colorado, 2016). La detección de este tipo de sustancias es un evento peligroso debido a que implica arriesgar vidas humanas; por esta razón esta tarea es realizada por canes entrenados para búsqueda y detección de explosivos y sustancias controladas.

Considerando que la participación directa de personas y canes en la detección de sustancias explosivas es de alto riesgo, la necesidad de contar con personal altamente cualificado para el entrenamiento, formación y cuidado de canes adiestrados y la afectación de las condiciones del medio ambiente en los canes para la detección han promovido la investigación y desarrollo de nuevas alternativas para la detección de sustancias explosivas.

En los últimos años, muchos esfuerzos científicos y económicos se han invertido en investigar y desarrollar instrumentos y sistemas capaces de detectar bombas y explosivos ocultos, habiéndose encontrado los mejores resultados con radar de penetración terrestre (GPR) (Gutierrez, 2011); activación nuclear (Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional de Colombia, 2014), sistemas acústicos-sísmicos

(Adams, 2013) y desarrollo de sistemas electrónicos en la imitación del sentido olfativo (Botre, Gharpure, & Shaligram, 2009).

Una posibilidad para emular el funcionamiento del sentido olfativo es el uso de sensores químicos para adquirir las señales en fase gaseosa y el uso de un microprocesador para la generación de modelos para el análisis cuantitativo y cualitativo de las sustancias. Esta área de trabajo es conocida como sensores “olfativos” o “narices electrónicas”.

Según Gardner y Barlett (1993) las narices electrónicas son “un instrumento que comprende una agrupación de sensores químicos con especificidad parcial, junto a un sistema de reconocimiento de patrones, capaz de reconocer aromas simples o complejos”. (Moreno et al, 2009)

Para reconocer los aromas usando la nariz electrónica, se debe localizar e identificar las fuentes de emisión, por lo que es necesario la integración de estas a estructuras móviles. Las estructuras móviles permiten realizar la navegación e incrementar la autonomía en la localización de la fuente de olor; para ello es necesario el uso de tecnología integrada (embebida) logrando eliminar la intervención humana. (Company & Walter, 1968).

El uso de la tecnología embebida ofrece varias ventajas interesantes: disponibilidad de una capa de abstracción para la adquisición y el control de la señal a través de un sistema operativo, programación de alto nivel de los algoritmos de procesamiento de señal y almacenamiento de datos grandes en discos. Además, permite una mayor capacidad de procesamiento al analizar datos en tiempo real. (Perea et al, 2002)

Es así que, en el año 2009, se planteó el desarrollo de una nariz electrónica embebida sin embargo hacen uso de una tarjeta de adquisición de datos en conjunto con un PC que se encarga de realizar el procesamiento en tiempo real, no obstante, esta nariz electrónica no cuenta con autonomía de procesamiento. (Botre, Gharpure, & Shaligram, 2009)

El presente proyecto se encuentra enmarcado dentro del proyecto de investigación pic-2016-009 institucional “LOCALIZACIÓN DE TNT Y PÓLVORA BASE DOBLE A TRAVÉS DE SENSADO QUÍMICO EN UN ENTORNO CONTROLADO MEDIANTE ROBÓTICA COOPERATIVA. (SmellRobSense)”

dirigida por la Dra. Ana Guamán; en este contexto se han desarrollado dos temas de proyectos de investigación para la obtención del título de grado, estos son: “DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ROBÓTICO PARA EL ANÁLISIS DE ACETONA EN UN AMBIENTE CONTROLADO” (Gaibor & Mediavilla, 2016), y “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO DE SENSADO QUÍMICO, PARA LA DETECCIÓN DE TRINITROTOLUENO (TNT) Y PÓLVORA BASE DOBLE EN UN AMBIENTE CONTROLADO” (López, 2016).

Los proyectos de investigación antes mencionados servirán de base para el desarrollo del presente proyecto, que unificará el sistema robótico con la nariz electrónica para detectar sustancias explosivas como el TNT y Pólvora base doble en ambientes controlados.

1.2. Justificación e importancia

Las Fuerzas Armadas del Ecuador tienen como misión apoyar a la seguridad integral del Estado mediante el control de armas, municiones, explosivos y accesorios en cuanto a su reglamentación, manipulación y comercialización, por lo que el presente proyecto está enmarcado dentro de una de las áreas de investigación, desarrollo tecnológico e innovación de las Fuerzas Armadas como es: Soberanía y Defensa.

Para el cumplimiento de dicha misión se crea el departamento de control de armas con la siguiente misión: “Contribuir a la erradicación del tráfico ilícito de armas, municiones, explosivos, materiales y sustancias relacionadas, a través de la planificación, seguimiento y evaluación, a fin de coadyuvar a la seguridad ciudadana y al logro de una cultura de desarme”. (CCFFAA, 2016).

En la Tabla 1 se muestra los resultados de las diferentes operaciones de control de armas ejecutadas en el periodo 2015, que en lo referente a explosivos suman 61.988, evidenciando el crecimiento de actos ilegales, por tal razón es importante el desarrollo de aplicaciones tecnológicas como el uso de narices electrónicas para ayudar en la detección de explosivos y así contribuir en las operaciones de control de armas mejorando las condiciones de seguridad de la población.

Tabla 1
Acciones realizadas en control de armas, municiones y explosivos

RESULTADOS	TOTAL
Número de Operaciones Militares (patrullajes)	36.361
Número de armas decomisadas, incautadas, abandonadas	1.725
Número de municiones decomisadas, incautadas, abandonadas	128.371
Número de explosivos decomisados, incautados, abandonados	9.002
Número de fulminantes retirados	2.754
Metros de mecha lenta retirada	21.153
Unidades de nitrato de amonio retiradas	8.571
Número de cápsulas ordinarias retiradas	6.780
Número de tacos de dinamita incautados	13.728
Número de vehículos inspeccionados	497.949
Número de vehículos retenidos	790
Número de personas aprehendidas	172

Fuente: (Ministerio Nacional de Defensa, 2015)

Según Gaibor y Mediavilla (2016) integrar narices electrónicas a mecanismos móviles asemejan el comportamiento de un can entrenado; es decir, podrán captar un aroma y buscar la fuente de emisión a través de una trayectoria usando el sentido olfativo. En la investigación desarrollada por Gaibor y Mediavilla (2016) hacen uso de una matriz de sensores químicos de 1 x 2 utilizando los sensores Fíguro TGS2600 y TGS2602 acoplados a un robot móvil “Dagu Wild Thumper 6WD”, (ver Figura 1), para detectar la procedencia de una fuente de alcohol en un entorno sin obstáculos y controlado. En esta investigación se consigue llegar a la ubicación de la fuente de olor con el 70% de efectividad y con un error de 0.5 [m] de distancia, pero se debe tomar en cuenta que no existe ningún tipo de procesamiento para discriminación entre distintas sustancias químicas, entre ellas sustancias explosivas. (Gaibor & Mediavilla, 2016).

Por otra parte, se cuenta con un prototipo de nariz electrónica desarrollado en el proyecto de titulación de López (2016) que cuenta con un bloque de sensado, bloque neumático y el bloque de adquisición, (ver Figura 2) cuyo objetivo principal fue discriminar Trinitrotolueno (TNT) y pólvora base doble de uso militar. En este caso se diseñó una matriz de sensores químicos de 3x2, donde se desarrolló un modelo de discriminación mediante la combinación de PCA y LDA con un clasificador kNN con

un 70% de discriminación sobre las sustancias TNT y Pólvora base doble y un 86.66% sobre las sustancias explosivas de las no explosivas. (López, 2016).

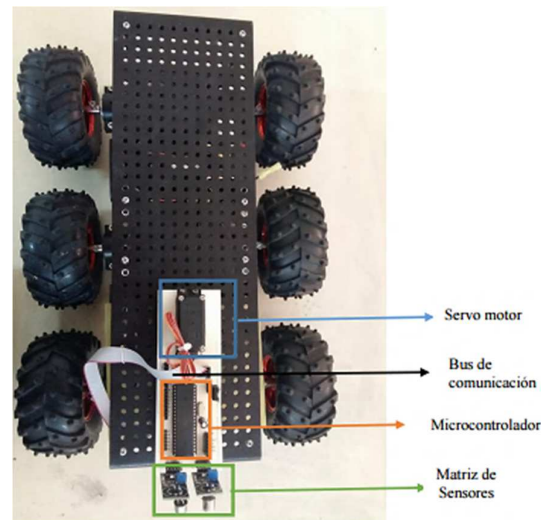


Figura 1. Matriz de sensores integrada al robot

Fuente: (Gaibor & Mediavilla, 2016)

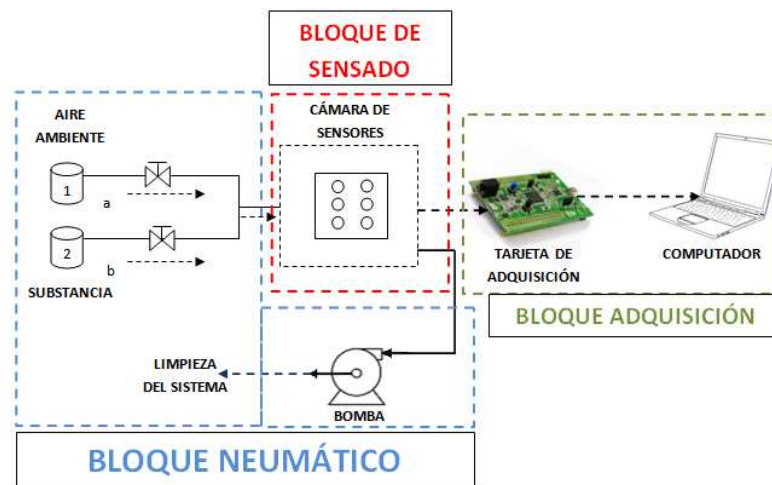


Figura 2. Diagrama de bloques del prototipo de nariz electrónica

Fuente: (López, 2016)

Tomando en cuenta que se pretende tener un dispositivo de olfacción integrado a un dispositivo móvil, se pretende unificar los trabajos de titulación antes mencionado.

Sin embargo, dicha integración no se lograría de forma directa; en primera instancia por las dimensiones que presenta la nariz electrónica (88x26 [cm] todo el sistema de instrumentación), con respecto al robot móvil “Dagu Wild Thumper 6WD” cuyas dimensiones son de 40x30x13 [cm]. Es evidente que en este espacio físico no se puede acoplar la nariz electrónica al igual que el circuito para el control del robot, adicional se considera un peso máximo de 5 [kg]. Además, la tarjeta de adquisición de señales está conectada a un ordenador, el mismo que realiza todo el procesamiento de modo OFF LINE, imposibilitando la autonomía del robot, la movilización y aún más el montaje.

El principal propósito del presente trabajo es optimizar y compactar el sistema de instrumentación del prototipo de la nariz electrónica desarrollado por López (2016), al robot móvil “Dagu Wild Thumper 6WD”. Adicionalmente, eliminar en el bloque de adquisición el ordenador para pasar de un modo OFF LINE (fuera de línea) a un sistema ON LINE (en línea), de tal manera el procesamiento será embebido dándole mayor autonomía al sistema robótico.

1.3. Alcance

El perfil del proyecto de titulación presentado pretende colaborar al proyecto de investigación “LOCALIZACIÓN DE TNT Y PÓLVORA BASE DOBLE A TRAVÉS DE SENSADO QUÍMICO EN UN ENTORNO CONTROLADO MEDIANTE ROBÓTICA COOPERATIVA. (SmellRobSense)”, orientado a aplicaciones militares.

Para esto el presente proyecto cumplirá con las siguientes características:

- Optimizar el diseño de los elementos electrónicos y neumáticos de la nariz electrónica.
- Embeber el procesamiento de la nariz electrónica en tiempo real de manera que el robot móvil pueda tomar decisiones respecto a su navegación para detectar correctamente muestras de TNT y de pólvora base doble.
- Elaborar un modelo matemático para la nariz electrónica que a través del dopaje sea capaz de clasificar y cuantificar las sustancias explosivas.
- Adaptar la nariz electrónica al robot móvil.

- Crear una interfaz de decisión para la navegación del robot discriminando posibles interferencias producidas por sustancias ajenas a la experimentación.
- Realizar prueba de identificación de sustancias peligrosas como TNT y pólvora base doble, que permiten asegurar la correcta autonomía de detección, así como la discriminación de sustancias no peligrosas.

En la Figura 3 se puede observar el funcionamiento esperado del robot dentro de un ambiente controlado. El sistema robótico realizará la búsqueda de los posibles objetos sospechosos dentro del entorno de trabajo, una vez localizados, el robot se dirigirá a cada uno de ellos donde la nariz electrónica analizará dicho objeto con el objetivo de detectar si es o no una sustancia explosiva, y discriminará que tipo de sustancia explosiva.

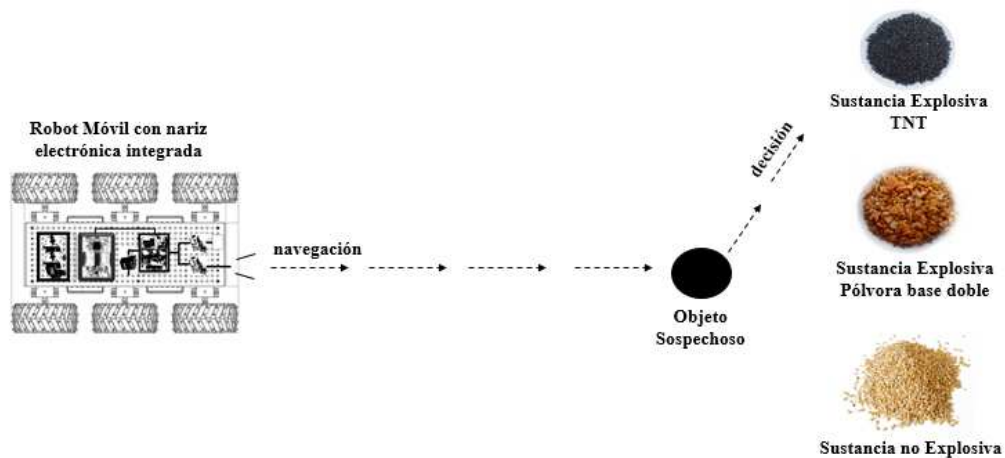


Figura 3. Prototipo en un ambiente controlado con sistema embebido

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Integrar el sistema de instrumentación del prototipo de nariz electrónica a un robot móvil para identificar sustancias explosivas como TNT y pólvora base doble dentro de un ambiente controlado.

1.4.2. Objetivos específicos

- Optimizar el diseño de la nariz electrónica orientada a aplicaciones militares.
- Incorporar la nariz electrónica dentro del robot móvil “Robot Dagu Wild Thumper” para conseguir autonomía en la detección de sustancias explosivas.
- Embeber el procesamiento de la nariz electrónica en tiempo real para detectar sustancias explosivas y permitir la toma de decisiones en la navegación del robot móvil.
- Crear un modelo que permita que la nariz electrónica sea capaz de identificar sustancias explosivas tales como la TNT y la pólvora base doble.
- Evaluar el desempeño general de la nariz electrónica acoplada al robot móvil en la detección de sustancias explosivas mediante pruebas de distintas sustancias explosivas y no explosivas.

1.5. Descripción del proyecto

El proyecto consiste en desarrollar un prototipo electrónico basado en sensores químicos de óxido metálico, para el reconocimiento y clasificación de diferentes sustancias, entre ellas el Trinitrotolueno (TNT) y la pólvora en base doble, de uso militar. Al mismo tiempo el presente proyecto pretende embeber la nariz electrónica y su procesamiento dentro de un robot móvil, para permitir autonomía al mismo.

Para lo cual se ha establecido diferentes actividades enmarcadas en capítulos que se desarrollarán de acuerdo a la ejecución de las mismas.

CAPÍTULO 2: Nariz electrónica

En este capítulo se abordará el estado del arte de narices electrónicas, una breve descripción del sistema olfativo humano y una comparación entre ambos sistemas. Además, se mencionará sobre narices electrónica embebidas enfocadas a la detección de sustancias explosivas.

CAPÍTULO 3: Optimización del prototipo de nariz electrónica

Esta etapa está destinada a la optimización del diseño del prototipo de la nariz electrónica, principalmente la caracterización de los sensores químicos, el diseño y acondicionamiento de la matriz de medición, la elaboración de los PCBs y la cámara de sensores. Adicional se hace mención del sistema neumático a usarse y la selección de las tarjetas de desarrollo que servirán para la adquisición de las señales y del procesamiento de las mismas. Se aplicará la metodología de diseño de experimentos (Leardi R. , 2009), para establecer los principales parámetros que afectan a cada una de las etapas de diseño de la nariz.

CAPÍTULO 4: Procesado de señal en tiempo real

En esta etapa se pretende pasar el sistema de procesado de señal realizado en modo OFF LINE a uno ON LINE. Para ello se va a aplicar herramientas para embeber la información en cuanto a su procesamiento y análisis, planteándose así un algoritmo que se adaptará a la solución del problema de detección de TNT y pólvora base doble de uso militar.

CAPÍTULO 5: Montaje y navegación en el sistema robótico

Una vez optimizado el sistema de instrumentación de la nariz electrónica y el sistema embebido del procesamiento de las señales, se puede dar paso a la etapa de acondicionamiento y montaje, donde se adecuará y ubicará todos los elementos en el robot para conseguir un diseño compacto y funcional. Además, se integrará el sistema de navegación con el sistema de identificación de la nariz electrónica para tener un sistema único de toma de decisiones.

CAPÍTULO 6: Pruebas y resultados

Se realizará una etapa de pruebas y simulaciones con el fin de verificar el comportamiento y la efectividad del sistema implementado, con referente al sistema

de instrumentación, embebimiento del procesamiento, algoritmos de decisión y navegación de la nariz electrónica.

CAPÍTULO 7: Conclusiones y recomendaciones

En la etapa final se redactarán las conclusiones y recomendaciones que se lograron en el desarrollo del proyecto. Con las recomendaciones se podrá realizar mejoras al prototipo y ampliar la investigación hacia ambientes no controlados y de aplicación real.

CAPÍTULO 2

NARICES ELECTRÓNICAS

En este capítulo se describe los conceptos necesarios para el desarrollo del presente proyecto de investigación, consta el estado del arte en cuanto a nariz electrónica, sus orígenes y aplicaciones, breve descripción sobre el sistema olfativo humano y una comparación entre ambos sistemas. Además, se abordará las narices electrónicas embebidas enfocadas a la detección de sustancias explosivas.

2.1. Narices electrónicas

Los cinco sentidos permiten la percepción de información de todo cuanto nos rodea, logrando conectar a las personas con el mundo exterior. Con el afán de mejorar las condiciones de vida del hombre, se han construido diversos dispositivos electrónicos que ayudan o remplazan ciertas funciones de los seres humanos, haciéndolas más seguras, confortables y económicas (Arroyo, 2015). Estos dispositivos emulan algunos de los sentidos humanos denominándolos “sentidos electrónicos” o “e-senses”, entre estos sentidos se destacan la visión, la audición, el olfato y el gusto.

Una nariz electrónica debe tomar una muestra de algún tipo de aroma y poder identificarla, clasificarla y/o cuantificarla. Esto significa que una nariz electrónica está constituida por varias partes:

- Un sistema de muestreo.
- Una matriz de sensores.
- Un sistema electrónico que extrae los parámetros fundamentales de la señal proveniente del sensor.
- Un ordenador o tarjeta procesada donde se llevará a cabo la identificación del olor.

2.1.1. Origen y aplicaciones de la nariz electrónica

El origen de la nariz electrónica se remonta a los años 60, cuando la compañía Bacharac Inc., construyó un dispositivo conocido con el nombre de Sniffer, para detectar gases inflamables y tóxicos resultado de los procesos industriales, pero no se consideró una nariz electrónica por contar con un solo sensor de gas. (Moreno, Caballero, Galán, Matía, & Jiménez, 2009)

En 1982, Persaud y Dodd realizaron estudios para entender los procesos del olfato biológico utilizando un conjunto de sensores semiconductores de óxidos metálicos, para luego cambiarlos por sensores basados en polímeros conductores. (Moreno, Caballero, Galán, Matía, & Jiménez, 2009)

En 1993, Gardner y Bartlett introducen la primera definición de nariz electrónica como: “Instrumento compuesto por un conjunto de sensores químicos electrónicos con especificidad parcial y un apropiado sistema de reconocimiento de patrones, capaz de reconocer olores simples o complejos”. (Moreno, Caballero, Galán, Matía, & Jiménez, 2009)

En un comienzo las narices electrónicas buscaban reemplazar a expertos en clasificación y valoración de aromas, debido al alto costo en tiempo y dinero, además que sus valoraciones se pueden ver afectadas por el cansancio, estado anímico, clima, etc. Lo que dio lugar a la fabricación comercial de narices electrónicas y la especialización de sensores por parte de las empresas, la mayoría son usadas para clasificaciones de aroma, o detección de olores y también para el reconocimiento de huellas olfativas de sustancias difíciles de percibir. De ahí que su importancia y utilización se haya extendido a otros campos como la agroindustria, medio ambiente, seguridad y la medicina.

Por ejemplo, en el campo de la agroindustria se ha utilizado la nariz electrónica para la clasificación de diferentes clases de vinos (Aleixandre et al, 2008), o para determinar la frescura de sardinas de Marruecos (El Barbri et al, 2008) e incluso para la discriminación del grado de madurez de frutas (Lebrun et al, 2008).

En cuanto a la industria alimentaria se ha utilizado para determinar la vida útil del queso doble crema clasificándolos en función de la temperatura y del tiempo de

almacenamiento, con una precisión cercana al 100%. (Osorio, Novoa, & Gutiérrez, 2010). También se han utilizado para la diferenciación de productos apícolas: miel, polen, propóleos; mediante el análisis del perfil aromático. (Zuluaga, Díaz, & Martha, 2011)

De igual manera las narices electrónicas se utilizan para controlar y evitar la contaminación ambiental, como por ejemplo el reconocimiento de sustancias contaminantes en el agua (Goschnick et al, 2005) o para detectar los gases de un volcán (Díaz, 2006) entre otros.

Las investigaciones y publicaciones antes mencionadas donde la utilización de narices electrónicas, sensores u otros dispositivos permiten desarrollar aplicaciones en diferentes ámbitos, servirán de guía como fuentes de consulta.

2.2. Comparación de la nariz electrónica con el sistema olfativo humano

El sentido del olfato es primordial para el ser humano, desde tiempos primitivos cuando se dependía de la habilidad olfativa para captar las señales del ambiente y así desarrollar conductas para la supervivencia, como encontrar alimento, interacción social e incluso para la reproducción.

El sentido del olfato detecta compuestos químicos a distancias mucho mayores que el sentido del gusto y se necesita una pequeña concentración del estimulante para desencadenar la sensación olfativa, dicha concentración debe poseer ciertas características como: ser volátil para poder inhalarse, hidrosoluble para que pueda atravesar la mucosidad hacia los cilios olfatorios y ser poco liposoluble. (Rodríguez, 2004).

La Figura 4 muestra el proceso olfativo que inicia cuando las moléculas del olor ingresan a las fosas nasales donde las glándulas olfatorias de Bowman las disuelve en distintos componentes químicos que son percibidos por las células olfativas, enviando la información del olor hacia el bulbo olfativo, que a través de las fibras nerviosas excitan los centros cerebrales estimulando las emociones y memorias relacionadas con esas sensaciones olfativas, finalmente las glándulas de los epitelios olfativos segregan enzimas para eliminar las moléculas olorosas limpiando la mucosa olfativa y terminando el proceso olfativo. (Hall, 2011)

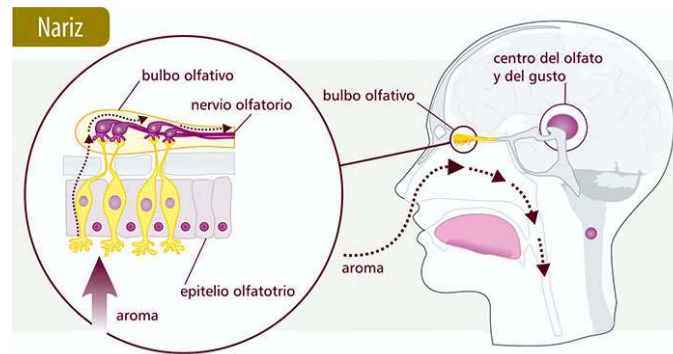


Figura 4. Proceso olfativo al percibir aroma
Fuente: (García, 2013)

La Figura 5 muestra la analogía del proceso olfativo humano con el de la nariz electrónica al momento de percibir un aroma. En la nariz electrónica el proceso inicia con la absorción del aroma por medio de un sistema neumático. Los patrones químicos presentes en la muestra son detectados por la matriz de sensores que representan a las células receptoras, los sensores transforman esta entrada química en una señal eléctrica, designado como huella digital olfativa. Finalmente, en el proceso olfatorio humano las señales son enviadas a los centros cerebrales que en la nariz electrónica son reemplazados por tarjetas microprocesadas donde se aplican técnicas de reconocimiento de patrones para discriminar, clasificar y/o predecir el tipo de aroma que se está analizando.

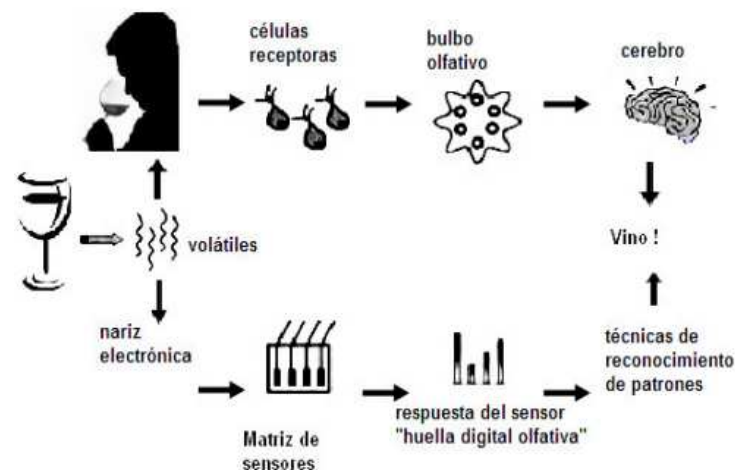


Figura 5. La nariz electrónica y el sistema del olfato humano
Fuente: (Pinheiro, Rodríguez, Schäfer, & Crespo, 2002)

En el sistema de la nariz electrónica existen tres módulos: químico, electrónico y el software. El módulo químico se refiere al acondicionamiento de la muestra y de la medición que realizan los sensores; el módulo electrónico hace el acondicionamiento de la señal eléctrica y la extracción de rasgos o características eléctricas que nos brindan cada uno de los sensores de la matriz; y el módulo de software reconoce la señal y permite su visualización. (Duran, 2005)

2.3. Nariz electrónica en aplicaciones para la detección de explosivos

En el campo de la seguridad y defensa se han desarrollado prototipos de narices electrónicas que aportan a contrarrestar y combatir problemas que causan el uso indebido de sustancias explosivas.

El grupo Swager del Instituto Tecnológico de Massachusetts utilizó en las narices electrónicas polímeros fluorescentes, que reaccionan a los compuestos volátiles basados en nitrógeno, particularmente mostraban un rendimiento cuántico de alta fluorescencia al momento de percibir el aroma emanado por el TNT y 2,4-DNT. (Fisher & Cumming, 2001), el sensor fue diseñado originalmente para la detección de minas terrestres.

Otro tipo de nariz electrónica es en base a ondas acústicas de superficie (SAW), para esto se desarrolló un cromatógrafo de gases para así detectar explosivos utilizando un cristal resonador que opera a 500 [Hz]. Cuando los vapores de la sustancia explosiva inciden sobre al área activa del cristal SAW se produce un cambio de frecuencia, donde el DNT mostró las más fuertes respuestas. (Linker, 2001)

Arias (2017) en su trabajo de titulación, desarrolló un prototipo de dispositivo móvil, con cuatro tipos de sensores químicos de la familia MQ para detección de sustancias ilícitas, ocho sensores ultrasónicos distribuidos sobre el dispositivo móvil para la detección de obstáculos y una cámara IP para observar el ambiente. La medición se realizó mediante medios electrónicos y utilizando redes neuronales para el procesamiento, detección y localización del origen de olor. (Arias, 2017)

Para la detección de otros tipos de explosivos como el PENT, RDX y TNT se utilizó una nariz electrónica diferencial compuesta de dos matrices de sensores químicos trabajando en paralelo, Uno de ellos forma el arreglo de medición y el segundo el

arreglo de referencia, las señales medidas por ambos arreglos se restan entre sí, produciendo una señal de efecto diferencial. Este sistema de medición es más estable y resistente a los cambios de las condiciones ambientales, por lo que su rendimiento es más robusto. (Brudzewski, Osowski, & Pawlowski, 2011)

2.4. Narices electrónicas como sistemas portables

Hoy en día las narices electrónicas son consideradas como una técnica de análisis de gran aplicabilidad para identificar y reconocer cualquier sustancia química, haciéndolas idóneas en la industria en cuanto al control de calidad, mejorando así el desarrollo de diferentes productos al intervenir en su caracterización, clasificación y diferenciación. (Quicazán, Díaz, & Zuluaga, 2011)

La Universidad de Sídney utilizó la tecnología de nariz electrónica para la detección de moléculas de aerosol, monitorea el aire de forma continua e identifica estas moléculas mediante la comparación de olores programados en una base de datos hasta un rango de 45 [m] de distancia. Este dispositivo se instaló para proteger sitios de gran tamaño como muelles, patios de ferrocarril y almacenes. (Gaffney, 2008)

Una nariz electrónica denominada zNose permite en tiempo real reconocer, analizar y cuantificar en menos de 10 [s] y con alta sensibilidad olores de explosivos como Detasheet, C4, TPTA (peróxido de acetona), gracias a la integración de un procesador PGA y sensores de estado sólido, además de contar con una base de datos que mediante el uso de índices de Kovats proporciona un método eficaz para reconocer olores de explosivos. (Staples E. , 2004)

De igual manera se desarrolló una nariz electrónica móvil con monitoreo en tiempo real, la cual utiliza sensores electroquímicos de la serie MQ que interactúan con las moléculas de los gases y mediante una resistencia interna convierten esta información en diferencias de potenciales, que entran a la tarjeta de control y seguidamente son enviadas vía Wifi a un ordenador donde finalmente se recopilan, analizan y grafican en tiempo real por medio de la aplicación PLX-DAQ. (Montenegro, Trejos, & Araúz, 2015)

La detección de explosivos es inevitablemente una garantía para mantener a salvo un lugar público y existen diferentes métodos y dispositivos, como el T-REX, que es

una nariz electrónica portable compuesta por 14 sensores: ocho sensores SAW, cuatro sensores fluorescentes y dos sensores QCM, que están integrados en una cámara de policarbonato con reducida zona muerta mejorando la recirculación del fluido. Una laptop controla el dispositivo mediante una interface en Labview por puerto USB, por lo que el algoritmo procesa toda la información en tiempo real, dando buenos resultados en la detección de dos familias de explosivos (Nitroaromáticos y ésteres nítricos). (Rousier et al, 2012).

CAPÍTULO 3

OPTIMIZACIÓN DEL PROTOTIPO DE NARIZ ELECTRÓNICA

En este capítulo se presenta la optimización del prototipo de nariz electrónica, el mismo que se dividió en cuatro temas puntuales.

El primer tema se enfoca en un análisis de un prototipo anterior presentado en el trabajo de titulación de López (2016), el segundo tema aborda la optimización electrónica realizada al prototipo, es decir la selección de los sensores químicos, diseño y elaboración de las PCBs y cámara de sensores. El tercer tema, explica la optimización neumática y el desarrollo del diseño de experimentos, donde se establecerá los parámetros idóneos para el mejor desempeño del prototipo final. Y finalmente, el último tema se enfoca en la selección de las tarjetas de desarrollo para optimizar el bloque de adquisición.

3.1. Análisis del prototipo inicial de nariz electrónica

En el proyecto de titulación de López (2016), se desarrolló un prototipo de nariz electrónica, el cual cuenta con un bloque de medición, bloque neumático y bloque de adquisición como se muestra en la Figura 2. Las dimensiones de todo el sistema de la nariz electrónica en cuanto al largo y ancho son de 88x26 [cm].

El primer bloque del prototipo consta principalmente de la matriz de sensores químicos de la serie TGS Figaro cuya configuración es un arreglo de 3x2, es decir, dos columnas de tres sensores. Los sensores usados en este trabajo fueron 825, 822, 826, 2610. Además, posee una carcasa de aluminio, de 10,5x13.5x7,5 [cm], con un volumen de 1.063,13 [cm^3].

El segundo bloque representa la respiración biológica mediante un sistema neumático que realiza dos estados: estado de absorción y estado de limpieza. Posee dos tuberías diferentes una de 1/8" y la otra de 3/8" dando un volumen de 26,32 [cm^3] que están conectadas a dos electroválvulas. La bomba de absorción posee un caudal de 1,08 [l/min].

Para realizar las pruebas de experimentación se ocupó dos viales de vidrio, que contenían una mezcla de 1 [g] de sustancia explosiva (TNT o Pólvora base doble) y 1 [ml] de alcohol. Además, el tiempo de cada experimento era de 601,5 [s] para realizar la absorción y limpieza.

Finalmente, el tercer bloque que está constituido por la tarjeta de adquisición STM32F4 DISCOVERY, seleccionada por tener gran facilidad de comunicación a un ordenador mediante puerto USB, permitiendo sincronizar los datos de adquisición y crear una base de datos mediante el programa Matlab R2012b. El ordenador es usado para realizar el procesamiento de los datos y la creación de modelos realizado en modo OFF LINE. (ver Figura 2)

En el presente proyecto de investigación se integrará la nariz electrónica sobre un robot móvil que identificará objetos sospechosos y navegará hacia ellos con el fin de detectar la presencia o no de sustancias explosivas, considerando que el preprocesamiento de las señales, el modelo de discriminación y el algoritmo de navegación debe ser embebido a fin de mejorar la autonomía del robot.

Con lo anteriormente expuesto se requiere optimizar los tres bloques del prototipo de nariz electrónica. Para el bloque de medición se considerará únicamente los sensores sensibles a las sustancias de interés, con un arreglo diferente de 3x2 en la matriz de sensores. En cuanto al bloque neumático se analizará la utilidad de los componentes neumáticos a fin de reducir el tamaño para que quepa en la estructura del robot móvil “Dagu Wild Thumper 6WD” (ver Figura 1) y para el bloque de adquisición, el procesamiento se deberá realizar en modo ON LINE para eliminar el uso del ordenador y garantizar autonomía en el sistema robótico.

Para ello se tomará en cuenta los siguientes puntos:

- Los sensores TGS series 825 y 826 quedarán descartados por no ser sensibles a las sustancias de interés según la conclusión de López (2016), y determinar el arreglo de la matriz de sensores que garanticen un mejor tratamiento de las señales al momento de la medición.
- Disminuir las dimensiones de los circuitos PCBs para reducir el volumen de la cámara de sensores.

- Para el bloque neumático se analizará el uso de las electroválvulas considerando que la medición de las sustancias no se hará dentro de los viales.
- Se analizará la cantidad mínima de las sustancias explosivas y de alcohol, al igual el tiempo para realizar la absorción y limpieza de cada experimento.
- Evaluar la capacidad y utilidad de la tarjeta STM32F4 DISCOVER en vista que el procesamiento de las señales y el algoritmo de discriminación de las sustancias explosivas debe ser embebido.

3.2. Optimización del bloque de medición.

En el bloque de medición se considera tres acciones a realizarse. La primera es la selección y descripción de los sensores químicos a utilizarse en la nariz electrónica, la segunda es el diseño y elaboración de los circuitos PCBs y finalmente la elaboración de la cámara de sensores.

3.2.1. Selección de sensores

Los sensores integrados a la nariz electrónica deben cumplir los siguientes criterios: alta sensibilidad para los compuestos químicos, baja sensibilidad a la humedad y temperatura, alta reproducibilidad y estabilidad, corto tiempo de reacción y fácil calibración. (Schaller, Bosset, & Escher, 1998)

Los sensores usados para el desarrollo del presente proyecto son los Fígaro TGS 822 y los TGS 2610, por ser los sensores más sensibles al TNT y Pólvora base doble según concluye López (2016) en su trabajo de titulación.

El TGS 822 tiene dióxido de estaño como compuesto químico, presenta una conductividad mínima en el aire común, es sensible a solventes orgánicos, y a una variedad de gases combustibles, ideal para propósitos generales. Por otra parte, el TGS 2610 es un sensor que posee alta sensibilidad al Gas licuado de Petróleo, posee un bajo consumo de energía y un largo rango de vida útil, una característica principal que lo diferencia es que el calentador debe tener una corriente máxima de 56 [mA].

Ambos sensores cuentan con un Heater (Calentador) que permite tener una temperatura interna del sensor para que pueda reaccionar el elemento químico que contienen frente a los componentes del aire. Estos sensores forman parte de la categoría de óxido metálico, tienen las siguientes características:

- La conductividad del sensor cambia acorde a la concentración del flujo de aire que está pasando por el sensor.
- La resistencia del sensor cambia en función de la conductividad tal como se expresa en la Ecuación (1).

$$R_s = A * C^{-\alpha} \quad (1)$$

Donde:

R_s : Es la resistencia eléctrica del sensor

A : Es una constante propia de cada sensor

C : La concentración de gas

α : Pendiente de la curva de la resistencia del sensor obtenida del fabricante

- La salida de voltaje para ambos sensores viene dada por la Ecuación (2):

$$V_{out} = \frac{R_L * V_C}{R_s + R_L} \quad (2)$$

Donde:

R_s : Resistencia eléctrica del sensor.

R_L : Resistencia de carga

V_C : Voltaje de la fuente de alimentación del sensor

V_{out} : Voltaje de salida del sensor según concentración de gas

En la Figura 6 se observa el circuito de instrumentación de ambos sensores, donde V_H representa el voltaje del Heater y en la Tabla 2 la distribución y descripción de los distintos pines.

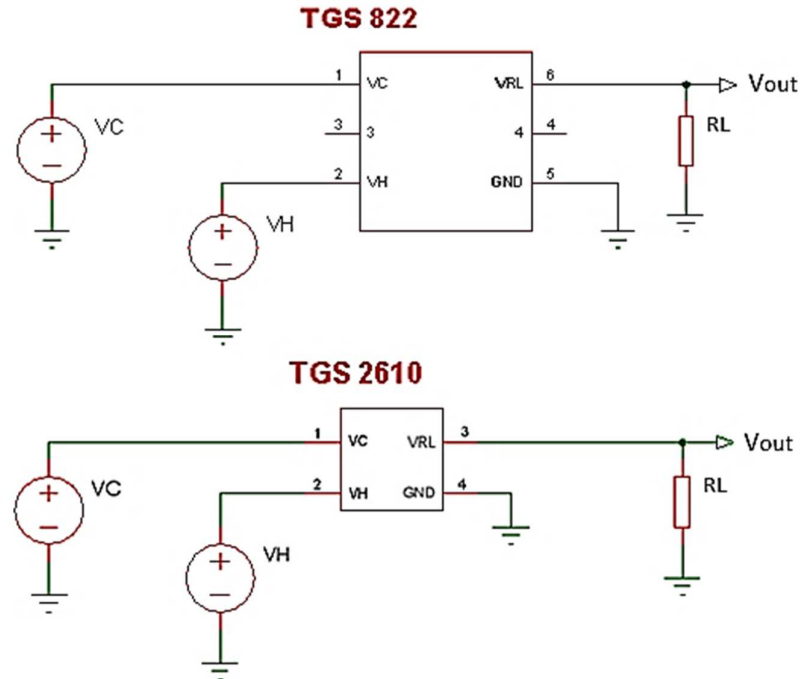


Figura 6. Circuito instrumentación TGS 2610 y TGS 822

Tabla 2
Distribución de los pines del sensor TGS 822 y TGS 2610

Pin	Sensor	Tag	Descripción	Tipo	Valor
1	Ambos	VC	Alimentación positiva del circuito	DC	$< 24 \text{ V}$ $5 \pm 0,2 \text{ V}$
2	Ambos	VH	Alimentación del Heater	AC-DC	$5 \pm 0,2 \text{ V}$
3	Ambos	3	Puente interno con PIN 1	DC	X
		VRL	Respuesta del sensor		
4	Ambos	4	Puente interno con PIN 6	DC	X
		GND	Referencia (Tierra)		
5	TGS 822	GND	Referencia (Tierra)	DC	$0 \pm 0,2 \text{ V}$
6		VRL	Respuesta del sensor		

3.2.2. Diseño y elaboración de PCBs para la matriz de sensores

Tomando en cuenta que los sensores TGS 822 y TGS 2610 fueron seleccionados, entonces se propone generar dos matrices de 1x2 donde cada matriz cuenta con dos sensores: un TGS 882 y un TGS 2610. La razón para crear dos matrices de sensores es para imitar la diversidad del sistema olfativo.

En la Figura 7 se muestra la disposición de las dos matrices, una sobre otra y con los sensores en posición invertida, con el fin de garantizar que el mismo flujo de aire impregna los sensores al mismo tiempo.

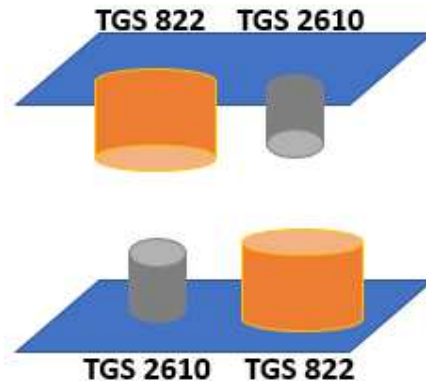


Figura 7. Ubicación de las matrices de sensores

Sabiendo la distribución de los sensores y la ubicación de ambas matrices se realiza el diagrama esquemático de los circuitos usando el software “PROTEUS” y para el diseño de los PCBs, se usó el software “ARES”, ambos de la empresa Labcenter Electronics. Se debe considerar que ambos software no cuentan con las librerías de PCB de los sensores Fígaro, por lo que fue necesario crear las mismas.

PCB inferior

Para la alimentación del sensor TGS 822 es necesario el uso de una fuente de tensión positiva de 5 [V] y para el sensor TGS 2610 se requiere una alimentación de 3,5 [V], por tal razón se usa un LM7805 conjuntamente con dos capacitores de 1.000 [uf] para regular la tensión de 5 [V] a 3,5 [V], la misma que se usará para el calentador (Heater) de ambos sensores. La PCB inferior cuenta con cuatro potenciómetros (RV1, RV2, RV3, RV4) usados para el acondicionamiento de la señal de salida (V_{out}) de los cuatro sensores. Además, cuenta con una bornera denominada “Alimentación” para conectar la fuente de 5 [V].

En la Figura 8 se observa el diagrama esquemático correspondiente al PCB inferior.

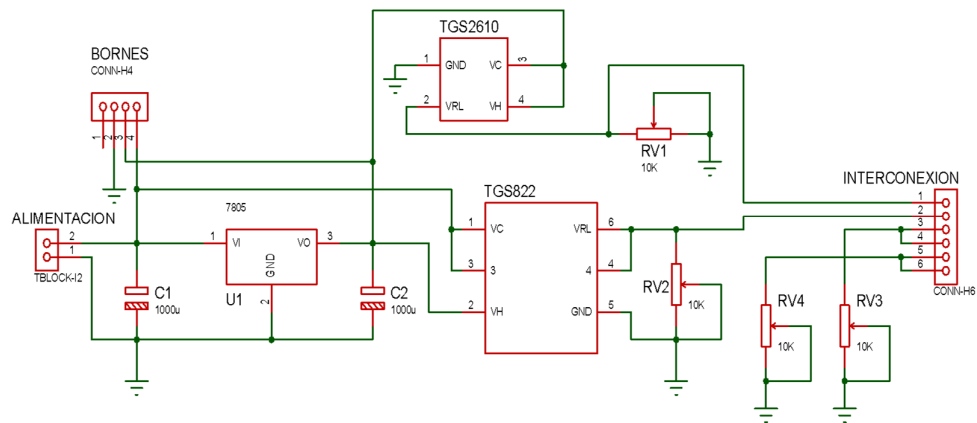


Figura 8. Diagrama esquemático PCB inferior

En la Tabla 3 se muestra la descripción de los terminales de conexión “Bornes” e “Interconexión”.

Tabla 3
Distribución de “Bornes” e “Interconexión” de PCB inferior

Pin	Descripción	
	Bornes	Interconexión
1	No tiene conexión	Señal de salida de TGS2610 (S1)
2	Referencia (Tierra)	Señal de salida de TGS822 (S1)
3	Tensión Positiva de 3,5 [V]	Señal de salida de TGS2610 (S3)
4	Tensión Positiva de 5 [V]	Señal de conexión TGS2610 Placa Superior
5	-	Señal de salida de TGS822 (S4)
6	-	Señal de conexión TGS822 Placa Superior

La Figura 9 muestra el resultado final del diseño para el PCB Inferior y la visualización en tres dimensiones de la placa. Las dimensiones de la misma son 52x45 [mm].

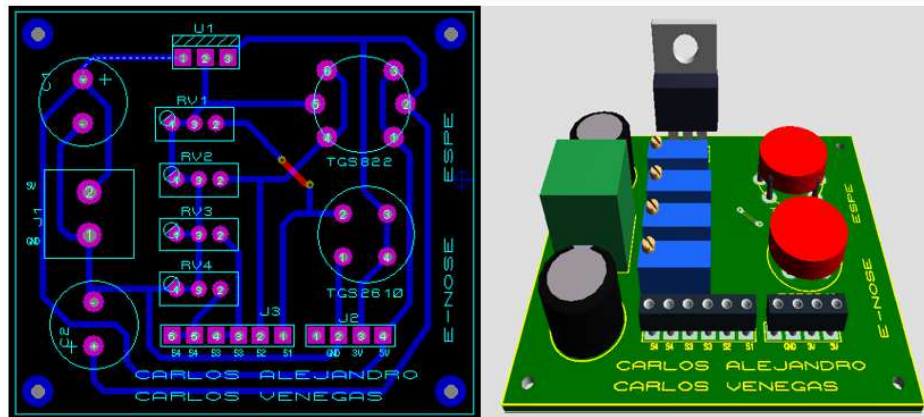


Figura 9. Diseño y visualización 3D de PCB inferior

PCB superior

La PCB superior cuenta únicamente con dos sensores: un TGS 2610 y un TGS 822. Los potenciómetros (RV3, RV4) para el acondicionamiento de la señal de salida (Vout) de los sensores se encuentran en la PCB inferior.

En la Figura 10 se observa el diagrama esquemático correspondiente al PCB superior.

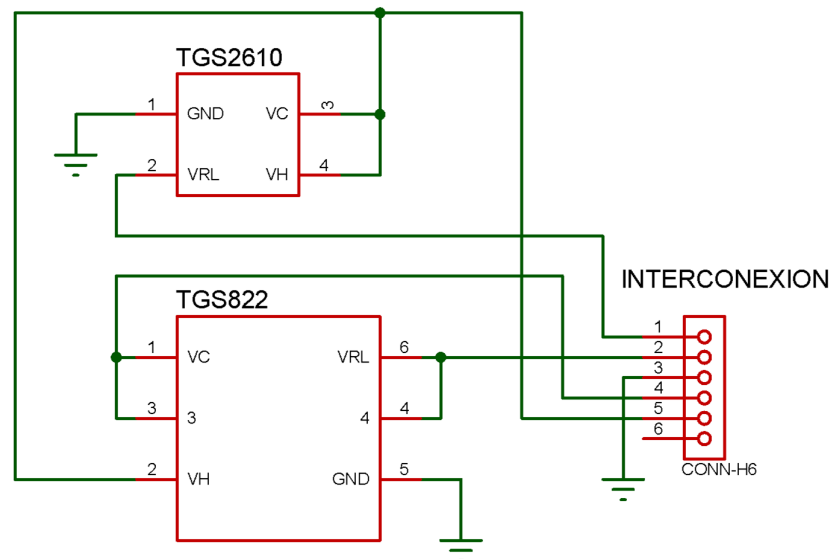


Figura 10. Diagrama esquemático PCB superior

En la Tabla 4 se muestra la distribución de los terminales de conexión “Interconexión” que sirven para alimentar el circuito y enviar las señales de salida (Vout) a la PCB inferior.

Tabla 4
Distribución de "Interconexión" de PCB superior

PIN	Descripción
1	Señal de conexión TGS2610 Placa Inferior
2	Señal de conexión TGS822 Placa Inferior
3	Referencia (Tierra)
4	Tensión Positiva de 5 [V]
5	Tensión Positiva de 3,5 [V]
6	No tiene conexión

La Figura 11 muestra el resultado final del diseño para el PCB Superior y la visualización en tres dimensiones de la placa. Las dimensiones de la misma son 45x22,5 [mm].

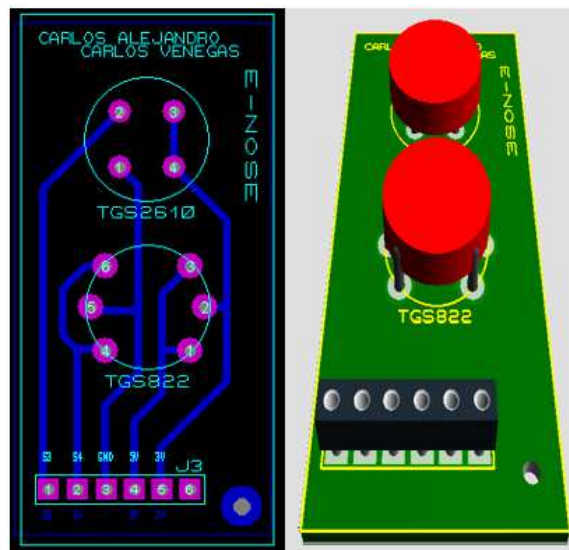


Figura 11. Diseño y visualización 3D de PCB superior

Los elementos usados para la elaboración de ambos PCBs se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5
Lista de componentes de PCBs

Ord	Nombre	Referencia	Cantidad
1	Capacitor 1000uF 25V	C1, C2	2
2	Figaro TGS2610	TGS 2610	2
3	Figaro TGS822	TGS 822	2
4	Potenciómetro de Precisión	RV1, RV2, RV3, RV4	4
5	Regulador LM7805	7805	1
6	Conector SIL (24 pines)	Bornes, Interconexión	1
7	Bornera de dos terminales	Alimentación	1

La Figura 12 muestra las PCBs superior e inferior elaboradas y acopladas entre sí.

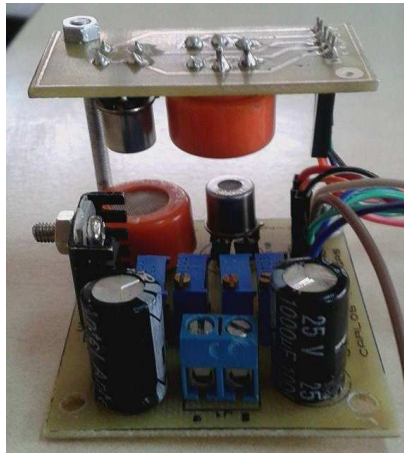


Figura 12. PCBs elaboradas y acopladas

3.2.3. Cámara de sensores

Para el diseño de la cámara de sensores se debe considerar aspectos como: facilidad de manipulación para adecuar las PCBs de los circuitos sin dificultad; ser compacta para limitar el volumen al momento del estado de limpieza; garantizar que la matriz de sensores pueda reaccionar por igual, por tal motivo se diseñó la misma en tres partes: tapa superior (8x8 [cm]), tapa lateral (8x6 [cm]) y cuerpo (8x8x6 [cm]). La cámara de sensores posee un volumen final de 384 [cm³]. (ver Figura 13)

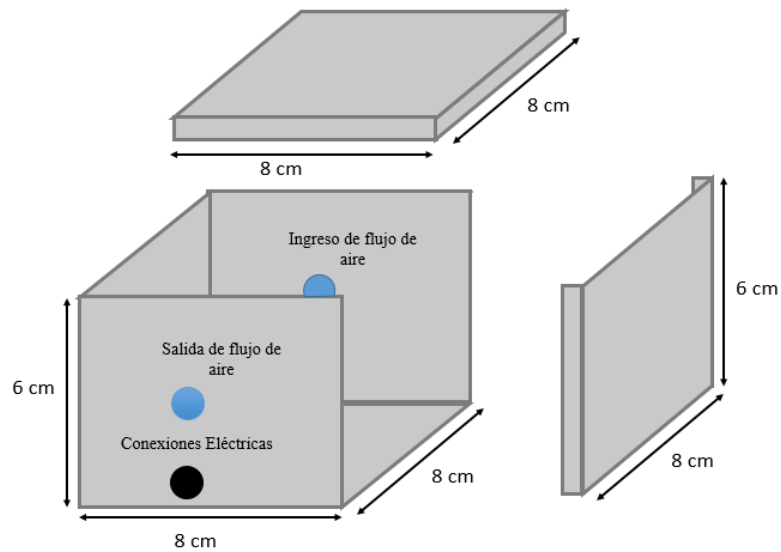


Figura 13. Esquema de la cámara de sensores

En el cuerpo de la cámara existen tres orificios; uno en la parte frontal y dos en su parte posterior, todos de 10 [mm] de diámetro. En la Figura 13 se puede apreciar que los orificios representados de color azul serán para la entrada y salida del flujo de aire que contienen los componentes químicos de las sustancias de interés, mientras que a través del orificio de color negro saldrán los cables de conexión a la tarjeta de desarrollo.

Considerando que el ambiente dentro de la cámara de sensores no debe estar contaminado de ningún olor previo al ingreso del flujo de aire, se consideró el uso de un material inerte para la elaboración de la cámara, por lo que se escogió un acero de alta aleación como el acero inoxidable (Ver Figura 14). El acero inoxidable son aleaciones de Fe-Cr o Fe-Cr-Ni con un contenido de al menos 10% de cromo y el menor contenido de carbono, es decir conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades físico-químicas. (Rarimez, 2014)



Figura 14. Cámara de sensores

En la Figura 15 se puede observar el acople de los circuitos PCBs (superior e inferior) con la cámara de sensores, la misma que posee un volumen de $384 [cm^3]$ que se reduce en un 63,8% en comparación a la cámara desarrollada por López (2016) con un volumen de $1.063,13 [cm^3]$.



Figura 15. Cámara de sensores acoplado los circuitos PCBs

3.3. Optimización bloque neumático

Para el funcionamiento del sistema olfativo humano es necesario un intercambio gaseoso (inspiración y expiración) que consiste en ingresar periódicamente un flujo de aire. Para la nariz electrónica se pretende emular el funcionamiento mediante un bloque neumático que permite el ingreso y salida de flujo de aire.

Dos son los procesos realizado por el bloque neumático:

- Absorción: El flujo de aire ingresa a la cámara de sensores para ser procesado por la nariz electrónica.
- Expiración o Limpieza: El flujo de aire sale de la cámara de sensores para permitir que un nuevo ingrese para ser analizado.

Para encontrar los parámetros correctos en cuanto a la cantidad de sustancia explosiva, volumen de alcohol, efecto de la temperatura ambiente, y los tiempos de absorción y expiración se realizó un diseño de experimentos con el objetivo de maximizar la discriminación de las sustancias explosivas.

Para poder realizar el diseño de experimentos se planteó un sistema neumático de absorción y limpieza similar al usado por López 2016, tal como se puede observar en la Figura 16. Este diseño se planteó para evitar que la sustancia explosiva se contamine con otros químicos presentes en el aire, pero se debe tomar en cuenta que el sistema neumático variará para el montaje final, en vista que la medición ya no se hará dentro de los viales, estará montado en la plataforma móvil y la muestra se encontrará a una distancia no mayor de 10 [cm].

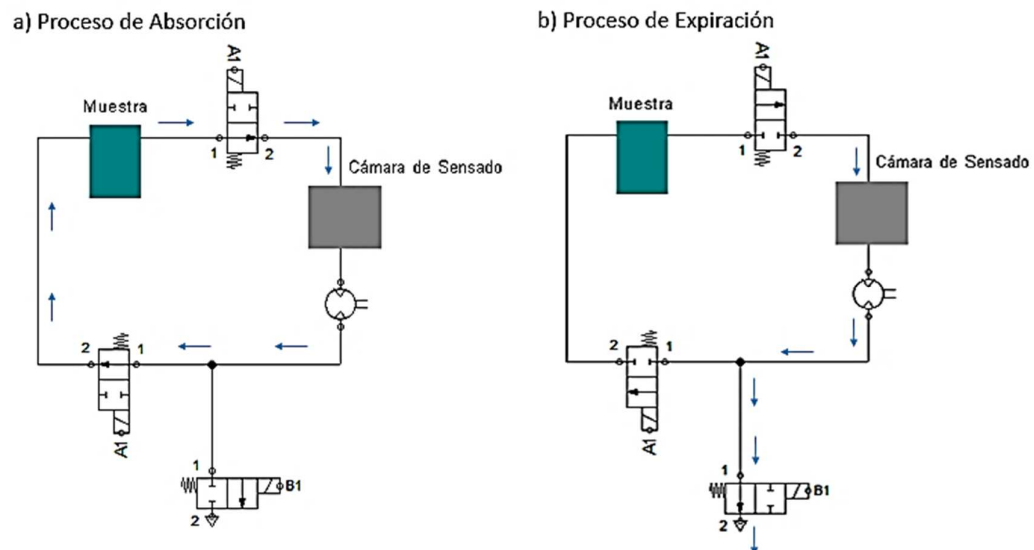


Figura 16. Diagrama neumático del prototipo de nariz electrónica para diseño de experimentos

El sistema inicia con el encendido de la bomba de succión y automáticamente empieza el proceso de absorción. En la Figura 16(a) se puede observar que las electroválvulas A1 se activan permitiendo el paso del flujo de aire hacia el vial que contiene la muestra del explosivo y a su vez arrastra el olor de las partículas de la substancia de interés hacia la cámara de sensores, mientras que la electroválvula B1 se desactiva asegurando que el flujo de aire no salga hacia el medio ambiente.

Una vez que se concluye el tiempo de absorción se activa el proceso de expiración o limpieza. En la Figura 16(b) se observa que se activa la electroválvula B1 y se desactivan las electroválvulas A1 asegurando no eliminar el aire concentrado en el vial con las muestras, pero haciendo que todo el flujo de aire que posee la cámara de sensores sea arrastrado hacia el medio ambiente, limpiando la misma hasta que la línea base de los sensores se reestablezca.

En la Tabla 6 se detallan los componentes que integran el sistema neumático implementado para el diseño de experimentos.

Tabla 6
Componentes del bloque neumático

Ord	Componente	Cant.	Función
1	Bombas de succión	1 unid	Absorber las substancias de interés y limpieza del sistema
2	Electro válvulas	3 unid	Dejar pasar el aire de limpieza del sistema o de arrastre de las partículas de las substancias de interés
3	Tubería de 1/8"	30 cm	Cañería del sistema neumático
4	Tubería de 1/4"	30 cm	Cañería del sistema neumático
5	Cargador nuts y férulas de 1/8"	2	Conectores para tubería y terminales para sistema neumático

3.3.1. Diseño experimental usando método “Diseño Factorial 2^k”

El diseño experimental inicio en los años de 1920 durante la era agrícola por Ronald A. Fisher, que incorporó principios estadísticos como: la aleatorización, realización de réplicas y formación de bloques, diseño factorial y el análisis de varianza. A inicios de

la década de 1930 se da paso a la era industrial donde Box y Wilson desarrollaron la metodología de superficies de respuesta (MSR). En 1970, Genichi Taguchi planteó el diseño paramétrico robusto (Montgomery, 2004).

Un experimento puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistemas para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida (Montgomery, 2004). Mediante la experimentación se obtienen datos que permite conocer el funcionamiento y desempeño de procesos y sistemas, estos resultados pueden ser afectados por la presencia de distintos factores como: temperatura, cantidad, tiempo, etc. Los factores son variables y/o características que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en la variable de respuesta. (Gutiérrez & De la Vara, 2012)

Los principios básicos del diseño experimental son:

- **La realización de réplicas**, es la repetición del experimento básico.
- **La aleatorización**, es el orden en que se realizan los ensayos experimentales (orden al azar).

La aplicación del diseño experimental en el ámbito de la ingeniería es una herramienta fundamental para mejorar el rendimiento y desempeño de un proceso, reduce el tiempo de desarrollo y costos globales principalmente en las fases iniciales del proceso, además permite establecer parámetros de diseño para que el producto tenga un funcionamiento correcto en diferentes condiciones de trabajo es decir que sea robusto. (Montgomery, 2004)

El diseño de experimentación Full Factorial 2^k permite que varios factores actúen sobre una respuesta. El número de experimentos se establece en base al 2^k donde K es el número de factores o variables bajo estudio y el 2 indica que cada factor tendrá únicamente dos niveles (bajo y alto) por lo que la respuesta será aproximadamente lineal. Estos niveles pueden ser cualitativos o cuantitativos. (Montgomery, 2004)

Se establecen cinco pasos a seguir para realizar un correcto diseño experimental, estos son:

Primero: Definir el objetivo de los experimentos

En esta etapa se desarrollan todas las ideas acerca de los objetivos del experimento, es decir los problemas o las preguntas específicas relacionadas al experimento para establecer el objetivo global.

Para este proyecto, se definió los siguientes objetivos:

- Determinar la cantidad de sustancia explosiva y de alcohol que la nariz electrónica sea capaz de detectar.
- Determinar el tiempo necesario para optimizar el proceso de absorción y limpieza de la nariz electrónica.
- Analizar la influencia de la temperatura en el desarrollo de los experimentos.

Segundo: Detectar los factores que puedan tener un efecto

Los factores son variables que pueden influir en el desempeño del proceso o sistema y estos pueden ser factores potenciales del diseño o bien factores perturbadores. Los primeros son los que se pueden variar en el experimento y los segundos pueden tener efectos considerables que deben tomarse en cuenta así no sean de interés. Una vez seleccionado estos factores se elige los rangos en que van a variar, así como los niveles en los que se hará la experimentación. En este trabajo se identificaron cinco factores de interés y se estableció si son de tipo potencial o perturbador. En la En la Tabla 7, se enlistan dichos factores con sus niveles de trabajo y la referencia.

Tabla 7
Identificación y especificaciones de los factores

Ord	Factor	Especificación	Nivel		Tipo	Ref.
			Bajo	Alto		
1	Cant. de Sustancia	≤ 2 [g]	0.5	2	Potencial	A
2	Cant. de Alcohol	≤ 1 [ml]	0.2	1	Potencial	B
3	Tiempo de Respiración	≤ 3 [s]	1	3	Potencial	C
4	Tiempo de Expiración	≤ 30 [s]	30	180	Potencial	D
5	Temperatura exterior	$20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$	16	25	Perturbador	E

Tercero: Planear/Programar los experimentos

En esta etapa se establecen horarios para realizar los experimentos, pero se recomienda que sea en diferente orden.

En este caso se plantea realizar un total de 32 experimentos (2^5 experimentos), para ello se puede usar tres notaciones diferentes. La primera es la notación geométrica “-” y “+”, la segunda identifica las combinaciones de los tratamientos mediante etiquetas con minúsculas y la tercera utiliza 1 y 0 para denotar los niveles alto y bajo en lugar de “-” y “+”. Las combinaciones de los factores en cada experimento pueden escribirse en orden estándar introduciendo los factores uno a la vez y combinando sucesivamente cada nuevo factor con los que se preceden de esta manera el orden estándar de un diseño 2^5 es (1), *a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, adb, cd, acd, bcd, abcd, e, ae, be, abe, ce, ace, bce, abce, de, ade, bde, abde, cde, acde, bcde, abcde*, donde se usa (1) para denotar que todos los factores están en el nivel bajo.

En la Tabla 8 se muestran los valores correspondientes de los niveles alto y bajo de los factores junto a la etiqueta correspondiente. Además, muestra las combinaciones de los factores durante la experimentación.

Tabla 8
Matriz experimental general con niveles de los factores

Núm. Exp	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	Etiqueta
1	-	-	-	-	-	0,5	0,2	1	30	16	(1)
2	+	-	-	-	-	2	0,2	1	30	16	a
3	-	+	-	-	-	0,5	1	1	30	16	b
4	+	+	-	-	-	2	1	1	30	16	ab
5	-	-	+	-	-	0,5	0,2	3	30	16	c
6	+	-	+	-	-	2	0,2	3	30	16	ac
7	-	+	+	-	-	0,5	1	3	30	16	bc
8	+	+	+	-	-	2	1	3	30	16	abc
9	-	-	-	+	-	0,5	0,2	1	180	16	d
10	+	-	-	+	-	2	0,2	1	180	16	ad
11	-	+	-	+	-	0,5	1	1	180	16	bd
12	+	+	-	+	-	2	1	1	180	16	abd
13	-	-	+	+	-	0,5	0,2	3	180	16	cd
14	+	-	+	+	-	2	0,2	3	180	16	acd
15	-	+	+	+	-	0,5	1	3	180	16	bcd

16	+	+	+	+	-	2	1	3	180	16	abcd
17	-	-	-	-	+	0,5	0,2	1	30	25	e
18	+	-	-	-	+	2	0,2	1	30	25	ae
19	-	+	-	-	+	0,5	1	1	30	25	be
20	+	+	-	-	+	2	1	1	30	25	abe
21	-	-	+	-	+	0,5	0,2	3	30	25	ce
22	+	-	+	-	+	2	0,2	3	30	25	ace
23	-	+	+	-	+	0,5	1	3	30	25	bce
24	+	+	+	-	+	2	1	3	30	25	abce
25	-	-	-	+	+	0,5	0,2	1	180	25	de
26	+	-	-	+	+	2	0,2	1	180	25	ade
27	-	+	-	+	+	0,5	1	1	180	25	bde
28	+	+	-	+	+	2	1	1	180	25	abde
29	-	-	+	+	+	0,5	0,2	3	180	25	cde
30	+	-	+	+	+	2	0,2	3	180	25	acde
31	-	+	+	+	+	0,5	1	3	180	25	bcde
32	+	+	+	+	+	2	1	3	180	25	abcde

El lugar de experimentación fue en un laboratorio de dimensiones 4,20x2,4 [m], la adquisición de señales se realizó desde el 15/03/2017 hasta el 25/03/2017 en una franja horaria comprendida desde las 08:00am hasta las 18:00pm de forma aleatoria para evitar el efecto memoria. En la Tabla 9 se muestra la planificación para la realización de los experimentos.

Tabla 9
Planificación para la realización de experimentos

Núm.	Etiqueta	Hora	TNT		POLVORA BASE DOBLE		
			Día	Orden	Hora	Día	Orden
1	-1	11:45	15/03/2017	1	14:50	15/03/2017	6
2	a	13:00	20/03/2017	28	14:15	19/03/2017	21
3	b	12:20	19/03/2017	20	10:00	16/03/2017	9
4	ab	08:30	22/03/2017	41	13:30	23/03/2017	53
5	c	12:05	15/03/2017	2	15:45	15/03/2017	8
6	ac	12:20	20/03/2017	27	14:30	19/03/2017	22
7	bc	10:22	19/03/2017	17	10:45	16/03/2017	10
8	abc	09:15	22/03/2017	42	16:00	23/03/2017	54
9	d	12:30	15/03/2017	3	15:15	15/03/2017	7
10	ad	12:00	20/03/2017	26	09:50	20/03/2017	23
11	bd	11:32	19/03/2017	19	11:30	16/03/2017	12

12	abd	10:20	22/03/2017	43	10:45	24/03/2017	55
13	cd	13:00	15/03/2017	4	14:00	15/03/2017	5
14	acd	11:30	20/03/2017	25	10:30	20/03/2017	24
15	bcd	11:00	19/03/2017	18	11:10	16/03/2017	11
16	abcd	11:15	22/03/2017	44	11:30	24/03/2017	56
17	e	08:15	23/03/2017	49	15:45	21/03/2017	40
18	ae	10:02	21/03/2017	33	18:00	25/03/2017	64
19	be	11:00	25/03/2017	57	14:30	22/03/2017	47
20	abe	12:15	16/03/2017	13	13:30	20/03/2017	29
21	ce	11:10	23/03/2017	50	15:00	21/03/2017	39
22	ace	12:15	21/03/2017	36	17:30	25/03/2017	63
23	bce	12:00	25/03/2017	58	15:30	22/03/2017	48
24	abce	13:00	16/03/2017	14	14:50	20/03/2017	30
25	de	12:00	23/03/2017	51	14:15	21/03/2017	38
26	ade	11:40	21/03/2017	35	17:00	25/03/2017	62
27	bde	13:00	25/03/2017	59	13:45	22/03/2017	46
28	abde	14:45	16/03/2017	16	15:45	20/03/2017	31
29	cde	12:30	23/03/2017	52	13:00	21/03/2017	37
30	acde	11:00	21/03/2017	34	15:00	25/03/2017	61
31	bcde	14:00	25/03/2017	60	12:20	22/03/2017	45
32	abcde	14:00	16/03/2017	15	09:27	21/03/2017	32

Cuarto: Realizar los experimentos

En esta etapa es importante realizar pruebas pilotos antes de iniciar con la experimentación definitiva, para corregir en caso de ser necesario errores existentes. De igual manera es importante la supervisión durante la realización de los experimentos.

Para la lectura de las señales de los sensores se ocupó las entradas analógicas de la tarjeta Arduino DUE, con un tiempo de muestreo de 50 [ms] en un período de 4 [min] por experimento dando así la recolección de 4800 muestras, igualmente los tiempos de absorción y limpieza de acuerdo a cada experimento. (ver Tabla 8 y Tabla 9)

Mediante el programa Jupyter se estableció la comunicación con la RASPBERRY para almacenar la información de cada experimento en una base de datos, esta información se visualizaba mediante el software PhpMyAdmin.

El preprocesamiento de las señales se realizó en modo ON LINE (ver Capítulo 4). Para obtener los parámetros necesarios para el análisis estadístico del diseño de

experimentos se utilizó el software Matlab, donde se procedió a promediar la respuesta de los cuatro sensores, obteniendo una señal única. Luego, se calculó la altura máxima (segmento color verde), como se puede observar en la Figura 17.

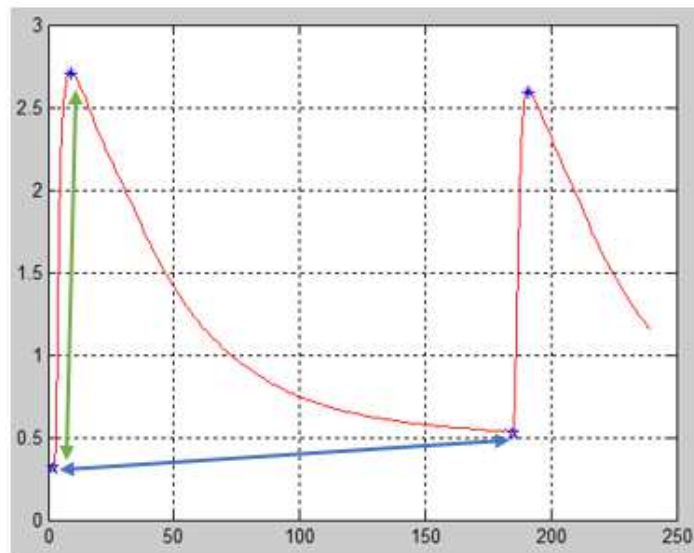


Figura 17. Promedio de la señal con puntos mínimos y máximos del exp. 32

Para lo cual se establecen dos parámetros a determinar que son:

- Y1: Distancia entre el punto mínimo y máximo de Pólvora base doble
- Y3: Distancia entre el punto mínimo y máximo de TNT

Este procedimiento se lo realizó a los 32 experimentos de Pólvora base doble y TNT obteniendo los parámetros Y1 y Y3, respectivamente, que se representan en la Tabla 10.

Tabla 10
Experimento de la nariz electrónica para Pólvora Base Doble y TNT

Núm. Exp	FACTOR					Etiqueta	DISTANCIA ENTRE PUNTO MÍNIMO Y MÁXIMO			
	A	B	C	D	E		Pólvora base doble		TNT	
							Ord. Exp	Y1	Ord. Exp	Y3
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	6	0,9393	1	0,5125
2	1	-1	-1	-1	-1	a	21	0,7983	28	0,7578
3	-1	1	-1	-1	-1	b	9	1,0543	20	1,0233

4	1	1	-1	-1	-1	ab	53	0,7959	41	0,9135
5	-1	-1	1	-1	-1	c	8	0,7891	2	0,6586
6	1	-1	1	-1	-1	ac	22	0,8139	27	0,7666
7	-1	1	1	-1	-1	bc	10	0,9615	17	0,4288
8	1	1	1	-1	-1	abc	54	0,9869	42	1,0033
9	-1	-1	-1	1	-1	d	7	1,4117	3	1,6390
10	1	-1	-1	1	-1	ad	23	1,5796	26	1,9302
11	-1	1	-1	1	-1	bd	12	1,5383	19	0,8120
12	1	1	-1	1	-1	abd	55	2,1718	43	1,7760
13	-1	-1	1	1	-1	cd	5	1,8492	4	2,1067
14	1	-1	1	1	-1	acd	24	2,1867	25	2,4892
15	-1	1	1	1	-1	bcd	11	2,0007	18	1,9745
16	1	1	1	1	-1	abcd	56	2,5698	44	2,4109
17	-1	-1	-1	-1	1	e	40	0,8567	49	0,8548
18	1	-1	-1	-1	1	ae	64	0,8022	33	0,6978
19	-1	1	-1	-1	1	be	47	0,7516	57	0,9084
20	1	1	-1	-1	1	abe	29	0,6845	13	1,1758
21	-1	-1	1	-1	1	ce	39	0,7890	50	0,7210
22	1	-1	1	-1	1	ace	63	0,9517	36	0,8561
23	-1	1	1	-1	1	bce	48	0,8510	58	0,8877
24	1	1	1	-1	1	abce	30	0,6137	14	0,7387
25	-1	-1	-1	1	1	de	38	1,8190	51	1,8428
26	1	-1	-1	1	1	ade	62	1,6611	35	1,8407
27	-1	1	-1	1	1	bde	46	1,8920	59	1,9269
28	1	1	-1	1	1	abde	31	1,8898	16	1,5509
29	-1	-1	1	1	1	cde	37	2,5692	52	2,2077
30	1	-1	1	1	1	acde	61	2,3128	34	2,1639
31	-1	1	1	1	1	bcde	45	2,7558	60	2,2928
32	1	1	1	1	1	abcde	32	2,3876	15	1,9763

Quinto: Analizar los datos obtenidos de los experimentos

En esta etapa se procede a usar métodos estadísticos para analizar los resultados y obtener conclusiones en función de los objetivos.

Con los datos obtenidos en la experimentación se realizó el análisis de los parámetros de ambas sustancias donde se determinó: contrastes de los efectos, la estimación de los efectos, suma de cuadrados y la contribución porcentual, que generan cada factor principal y las interacciones entre los mismos (ver Tabla 8).

Como método estadístico se usó el análisis de varianza (ANOVA), cuya hipótesis es que dos medias de dos o más poblaciones son iguales. En este caso se determinará si existen diferencias estadísticamente significativas en cada uno de los factores y/o combinaciones de los mismos.

El contraste del efecto se determina mediante Ecuación (3). El signo de cada grupo de paréntesis es negativo si el factor está incluido en el efecto, caso contrario será positivo; además en la expresión final se debe reemplazar el “1” por (1).

$$\text{Contraste}_{AB\dots K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1) \quad (3)$$

Por ejemplo, el contraste de ABCE sería:

$$\text{Contraste}_{ABCE} = (a - 1)(b - 1)(c - 1)(d + 1)(e - 1) \quad (4)$$

Calculados los contrastes de los efectos, se puede estimar los efectos y calcular las sumas de cuadrados, aplicando la Ecuación (5) y la Ecuación (6) respectivamente.

Donde n es el número de réplicas.

$$AB \dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{Contraste}_{AB\dots K}) \quad (5)$$

$$SS_{\text{Tratamiento}} = \frac{1}{n2^k} (\text{Contraste}_{AB\dots K})^2 \quad (6)$$

En la Tabla 11 se muestran los datos obtenidos para el parámetro Y1.

Tabla 11
Estimaciones de los efectos de los factores y suma de cuadrados del parámetro
Y1 de Pólvara Base Doble

PÓLVORA BASE DOBLE						
Ord. Exp	MIN - MAX Y1	Término del Modelo	Contraste del Efecto	Estimación del efecto	Suma de Cuadrados	Contribución Porcentual
6	0,9393	(1)				
21	0,7983	A	0,3779	0,0236	0,0045	0,031
9	1,0543	B	1,7757	0,1110	0,0985	0,681
53	0,7959	AB	0,2117	0,0132	0,0014	0,010
8	0,7891	C	4,7425	0,2964	0,7029	4,856
22	0,8139	AC	0,1373	0,0086	0,0006	0,004
10	0,9615	BC	-0,0449	-0,0028	0,0001	0,000
54	0,9869	ABC	-0,7709	-0,0482	0,0186	0,128
7	1,4117	D	19,1555	1,1972	11,4667	79,227
23	1,5796	AD	1,4687	0,0918	0,0674	0,466
12	1,5383	BD	1,8573	0,1161	0,1078	0,745
55	2,1718	ABD	1,2705	0,0794	0,0504	0,349
5	1,8492	CD	4,5945	0,2872	0,6597	4,558
24	2,1867	ACD	-0,8559	-0,0535	0,0229	0,158
11	2,0007	BCD	-0,4041	-0,0253	0,0051	0,035
56	2,5698	ABCD	-0,2321	-0,0145	0,0017	0,012
40	0,8567	E	1,1407	0,0713	0,0407	0,281
64	0,8022	AE	-2,3397	-0,1462	0,1711	1,182
47	0,7516	BE	-1,6471	-0,1029	0,0848	0,586
29	0,6845	ABE	-0,9491	-0,0593	0,0281	0,194
39	0,7890	CE	1,0053	0,0628	0,0316	0,218
63	0,9517	ACE	-2,8953	-0,1810	0,2620	1,810
48	0,8510	BCE	-0,1421	-0,0089	0,0006	0,004
30	0,6137	ABCE	-2,1433	-0,1340	0,1436	0,992
38	1,8190	DE	2,8183	0,1761	0,2482	1,715
62	1,6611	ADE	-2,6457	-0,1654	0,2187	1,511
46	1,8920	BDE	0,2665	0,0167	0,0022	0,015
31	1,8898	ABDE	-0,3575	-0,0223	0,0040	0,028
37	2,5692	CDE	0,7117	0,0445	0,0158	0,109
61	2,3128	ACDE	-0,1671	-0,0104	0,0009	0,006
45	2,7558	BCDE	0,4299	0,0269	0,0058	0,040
32	2,3876	ABCDE	0,4719	0,0295	0,0070	0,048

En cuanto al parámetro Y3 los datos obtenidos se muestran en las Tabla 12.

Tabla 12
Estimaciones de los efectos de los factores y suma de cuadrados del parámetro Y3 de TNT

TNT						
Ord. Exp	MIN - MAX Y3	Término del Modelo	Contraste del Efecto	Estimación del efecto	Suma de Cuadrados	Contribución Porcentual
1	0,5125	(1)				
28	0,7578	A	2,2502	0,1406	0,1582	1,196
20	1,0233	B	-0,2456	-0,0153	0,0019	0,014
41	0,9135	AB	0,3318	0,0207	0,0034	0,026
2	0,6586	C	3,5204	0,2200	0,3873	2,928
27	0,7666	AC	0,0042	0,0003	0,0000	0,000
17	0,4288	BC	-0,2680	-0,0168	0,0022	0,017
42	1,0033	ABC	-0,4046	-0,0253	0,0051	0,039
3	1,6390	D	18,0358	1,1272	10,1653	76,861
26	1,9302	AD	0,4212	0,0263	0,0055	0,042
19	0,8120	BD	-2,7542	-0,1721	0,2371	1,792
43	1,7760	ABD	-0,1716	-0,0107	0,0009	0,007
4	2,1067	CD	5,0866	0,3179	0,8085	6,113
25	2,4892	ACD	-0,8412	-0,0526	0,0221	0,167
18	1,9745	BCD	2,0158	0,1260	0,1270	0,960
44	2,4109	ABCD	-0,6308	-0,0394	0,0124	0,094
49	0,8548	E	1,4394	0,0900	0,0647	0,490
33	0,6978	AE	-3,5340	-0,2209	0,3903	2,951
57	0,9084	BE	0,7910	0,0494	0,0196	0,148
13	1,1758	ABE	-1,3444	-0,0840	0,0565	0,427
50	0,7210	CE	-1,4282	-0,0893	0,0637	0,482
36	0,8561	ACE	-1,0748	-0,0672	0,0361	0,273
58	0,8877	BCE	-0,4902	-0,0306	0,0075	0,057
14	0,7387	ABCE	-2,2056	-0,1379	0,1520	1,149
51	1,8428	DE	-0,1124	-0,0070	0,0004	0,003
35	1,8407	ADE	-2,0910	-0,1307	0,1366	1,033
59	1,9269	BDE	0,9760	0,0610	0,0298	0,225
16	1,5509	ABDE	-1,4022	-0,0876	0,0614	0,465
52	2,2077	CDE	-1,2612	-0,0788	0,0497	0,376
34	2,1639	ACDE	1,1254	0,0703	0,0396	0,299
60	2,2928	BCDE	-0,8448	-0,0528	0,0223	0,169
15	1,9763	ABCDE	2,2502	0,1406	0,1582	1,196

Como es un diseño 2^k con una sola réplica generalmente se lo denomina diseño factorial no replicado, por lo que no se puede realizar el análisis de varianza para los 31 efectos de diseño, porque no habría grados de libertad para el error.

El mínimo recomendable en grados de libertad para el error es de ocho, por lo que se aplica el principio de efectos esparcidos; es decir, la mayoría de los sistemas están dominados por algunos de los efectos principales y las interacciones de orden inferior, y la mayor parte de las interacciones de orden superior son insignificantes. (Montgomery, 2004). Aplicando este principio se descartan las interacciones de 3, 4 y 5 factores por poseer efectos pequeños, dando como resultado 16 interacciones descartadas que genera 16 grados de libertad, lo cuál es el doble de lo mínimo recomendado para los grados de libertad del error.

Por lo tanto, solo se considera las estimaciones de los efectos principales y de las interacciones dobles como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13
Estimaciones de los efectos principales e interacciones dobles de los parámetros Y1 y Y3

Término del Modelo	Estimación del efecto Y1	Estimación del efecto Y3
A	0,0236	0,1406
B	0,1110	-0,0153
AB	0,0132	0,0207
C	0,2964	0,2200
AC	0,0086	0,0003
BC	-0,0028	-0,0168
D	1,1972	1,1272
AD	0,0918	0,0263
BD	0,1161	-0,1721
CD	0,2872	0,3179
E	0,0713	0,0900
AE	-0,1462	-0,2209
BE	-0,1029	0,0494
CE	0,0628	-0,0893
DE	0,1761	-0,0070

Estos valores se analizaron con el diagrama de Pareto y el gráfico de Probabilidad Normal (Gráfico de Daniel), ambos gráficos muestran la variación que existe al comparar los efectos de cada parámetro entre sí (ver Tabla 13), lo que permitió definir qué efectos eran de mayor importancia y cuales no para descartarlos, mejorando el análisis de varianza.

El diagrama de Pareto aplica el principio de pocos vitales, muchos triviales, es decir los efectos con mayor importancia están en la parte superior y superan la línea del valor crítico, mientras que los efectos poco vitales en la parte inferior.

El gráfico de Probabilidad Normal muestra que los efectos que poseen una distribución normal con media igual a cero y varianza constante tienden a formar una línea recta siendo insignificantes y los efectos con mayor significancia están separados de esta.

En la Figura 18 se muestra el diagrama de Pareto y el gráfico de Probabilidad Normal del parámetro Y1.

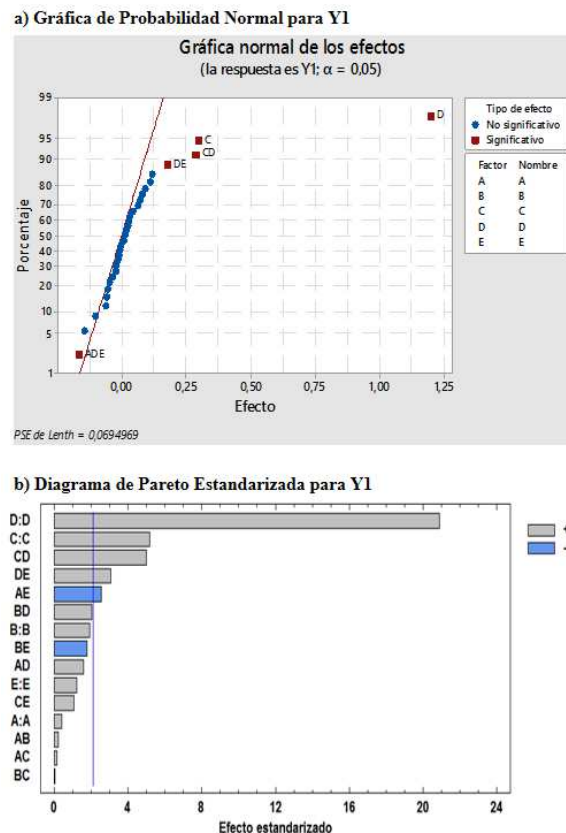


Figura 18. Gráfica de Probabilidad Normal y diagrama de Pareto de Y1

En la Figura 19 se muestran el diagrama de Pareto y la gráfica de Probabilidad Normal del parámetro Y3 correspondiente a la sustancia de TNT.

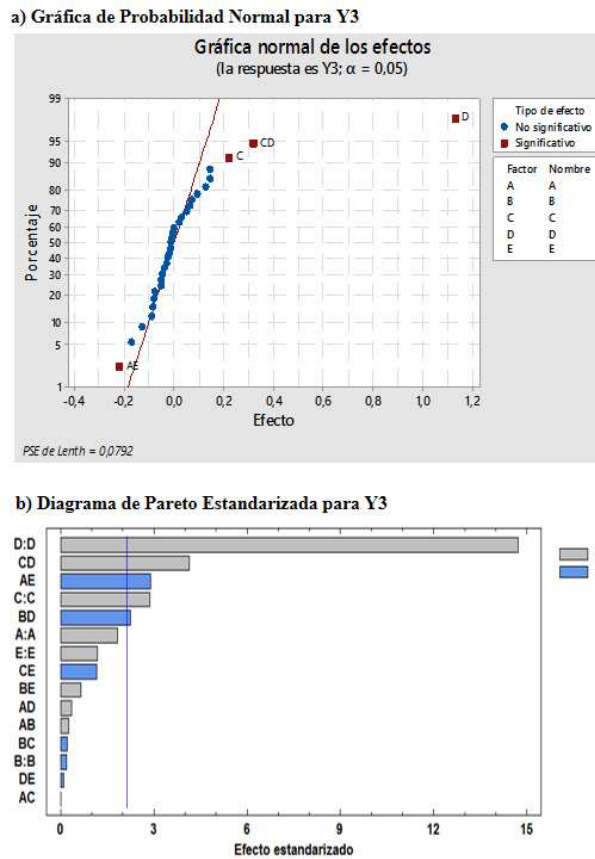


Figura 19. Gráfica de Probabilidad Normal y diagrama de Pareto de Y3

En la Figura 19(a) se observa que dos efectos principales el C y D, dos efectos de interacción doble CD y AE son significativos. En la Figura 19(b), se observa que los efectos principales C y D, las interacciones dobles CD, BD y AE son efectos significativos. Los efectos generados por la interacción doble de BD y AE puede ser considerar como no significativas, siendo así solo tres efectos significativos y el resto poco vitales por no sobrepasar el valor crítico.

Con los resultados de la Figura 18 y Figura 19, donde se establecen los efectos más significativos para cada parámetro y sabiendo el valor de la suma de cuadrados de estos (ver Tabla 11 y Tabla 12), se puede realizar la prueba estadística ANOVA.

Para iniciar el análisis de varianza es necesario calcular el cuadrado medio de tratamientos y el cuadrado medio del error, que responden a la Ecuación (7) y Ecuación (8).

$$CM_{Tratamiento} = \frac{SS_{Tratamiento}}{k - 1} \quad (7)$$

$$CM_{Error} = \frac{SS_{Error}}{N - k} \quad (8)$$

Donde $k - 1$ y $N - k$, representan los grados de libertad correspondientes a cada tratamiento y al error respectivamente.

Para determinar la suma cuadrada debida al error es decir dentro de los tratamientos (SS_{Error}), se debe calcular la suma de cuadrados total que se denota por la Ecuación (9).

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (9)$$

$$SS_T = SS_{Tratamientos} + SS_{Error} \quad (10)$$

Sabiendo que los grados de libertad son parámetros que definen las distribuciones T, ji-cuadrada y F, y que se determinan a partir de los tamaños muestrales involucrados. (Gutiérrez & De la Vara, 2012), dado que el análisis de la variabilidad que se percibe en un experimento se hace comparando varianzas, se ocupará la distribución F, entonces el estadístico se denota por la Ecuación (11):

$$F_o = \frac{CM_{Tratamiento}}{CM_{Error}} \quad (11)$$

Con el valor estadístico F_o se puede obtener la significancia observada o calculada, también conocida como *valor - p*, es el área bajo la distribución de referencia más allá del valor estadístico de prueba, entonces:

$$valor - p = P(F > F_o) \quad (12)$$

Dos de los estadísticos más útiles para medir la calidad global del modelo es el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado (R_{aj}^2), que se obtienen a partir del análisis de varianza, mediante la Ecuación (13) y la Ecuación (14).

$$R^2 = \frac{SS_T - SS_{Error}}{SS_T} \times 100 \quad (13)$$

$$R_{aj}^2 = \frac{CM_T - CM_{Error}}{CM_T} \times 100 \quad (14)$$

Cuando se eliminan efectos no significativos, el estadístico R_{aj}^2 crece. En el momento en el que se elimina y este estadístico decrece 3% o más, significa que ese efecto no debe excluirse. (Gutiérrez & De la Vara, 2012)

Análisis de varianza del parámetro Y1

Según el análisis realizado en la Figura 18 se establece cinco efectos significativos para el análisis de varianza del parámetro Y1, los términos para el modelo son C, D, AE, CD y DE.

Tabla 14
Análisis de varianza del parámetro Y1

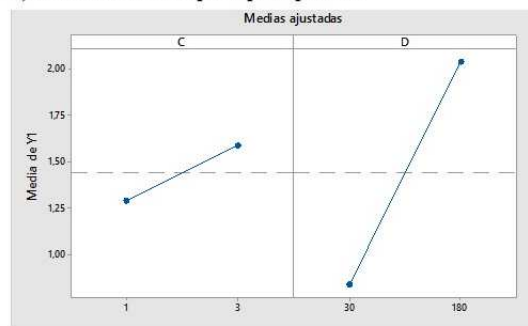
POLVORA BASE DOBLE					
Término del Modelo	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-p
C	0,7029	1	0,7029	21,300	0,0001
D	11,4667	1	11,4667	347,570	0,0000
AE	0,1711	1	0,1711	5,190	0,0312
CD	0,6597	1	0,6597	20,000	0,0001
DE	0,2482	1	0,2482	7,520	0,0109
Error total	0,8578	26	0,0330		
Total	14,1062	31			
R^2	93,9193%				
R_{aj}^2	92,7499%				

El análisis de varianza de la Tabla 14 muestra que los efectos principales C y D, al igual que las interacciones dobles AE, CD y DE, tienen un valor-p menor que 0,05 indicando que son estadísticamente significativos. Los coeficientes $R^2 = 93,92\%$ y $R_{aj}^2 = 92,75\%$ cumplen con la desigualdad $0.0 \leq R_{aj}^2 \leq R^2 \leq 100$, esto significa que los factores estudiados son responsables en alto porcentaje de la variabilidad

observada de distancia entre el punto mínimo y máximo de la señal de Pólvara base doble.

En la Figura 20(a), se muestra los efectos principales C y D siendo estos positivos, es decir entre mayor sea el tiempo de respiración mayor debe ser el tiempo de limpieza. En la Figura 20(b) se observa que por la interacción AE, que el efecto de la cantidad de Pólvara base doble es muy pequeña cuando la temperatura está en niveles bajos o altos, por lo que la cantidad de sustancia se mantendrá en el nivel bajo. La interacción CD indica que el tiempo de respiración tiene un efecto estable con un tiempo de limpieza en nivel bajo, pero un efecto positivo grande con el tiempo de limpieza en nivel alto. Finalmente, la interacción DE muestra que el tiempo de limpieza en temperaturas de nivel bajo o alto es muy grande manteniéndose positivo. Por lo tanto, los mejores índices para Y1 se obtienen cuando C y D en nivel alto, A en nivel bajo.

a) Gráfica de Efectos principales para Y1



b) Gráfica de Interacción para Y1

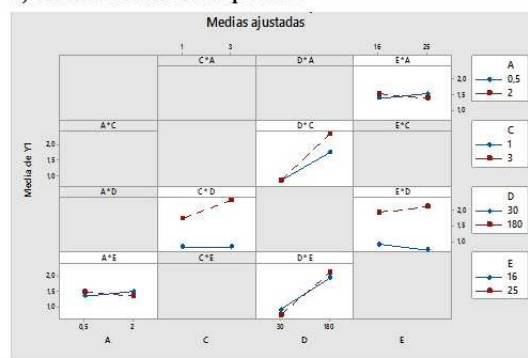


Figura 20. Gráfica de efectos principales e interacción para Y1

Análisis de varianza del parámetro Y3

Según el análisis realizado en la Figura 19 se establece cinco efectos significativos para el análisis de varianza del parámetro Y3, los términos para el modelo son C, D, AE, BD y CD.

Tabla 15
Análisis de varianza del parámetro Y3

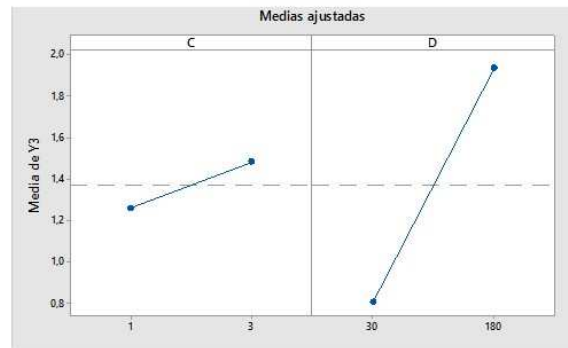
ANÁLISIS DE VARIANZA Y3					
Término del Modelo	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-p
C	0,3873	1	0,3873	9,4000	0,0050
D	10,1653	1	10,1653	246,7800	0,0000
AE	0,3903	1	0,3903	9,4700	0,0049
BD	0,2371	1	0,2371	5,7500	0,0239
CD	0,8085	1	0,8085	19,6300	0,0002
Error total	1,0710	26	0,0412		
Total	13,0595	31			
R^2	91,7992%				
R_{aj}^2	90,2221%				

El análisis de varianza de la Tabla 15 muestra que, en este caso, los efectos principales C y D, al igual que las interacciones dobles AE, BD y CD, tienen un p-valor menor que 0,05 indicando que son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%. Los coeficientes $R^2 = 91,8\%$ y $R_{aj}^2 = 90,22\%$ cumplen con la desigualdad $0.0 \leq R_{aj}^2 \leq R^2 \leq 100$, esto significa que los factores estudiados son responsables en alto porcentaje de la variabilidad observada de distancia entre el punto mínimo y máximo de la señal de TNT.

En la Figura 21(a) se muestra los efectos principales C y D que entre mayor sea el tiempo de respiración mayor debe ser el tiempo de limpieza. En la Figura 21(b) se observa que por la interacción AE, que el efecto de la cantidad de TNT es muy pequeño cuando la temperatura está en niveles bajos o altos, por lo que la cantidad de sustancia se mantendrá en el nivel bajo. La interacción BD muestra que el tiempo de limpieza en cantidades de alcohol en nivel alto o bajo es reducida. Finalmente, la interacción CD indica que el tiempo de respiración tiene un efecto reducido con un tiempo de

limpieza en nivel bajo, pero un efecto positivo con el tiempo de limpieza en nivel alto. Por lo tanto, los mejores índices para Y3 se obtienen cuando C y D en nivel alto, A en nivel bajo.

a) Gráfica de Efectos principales para Y3



b) Gráfica de Interacción para Y3

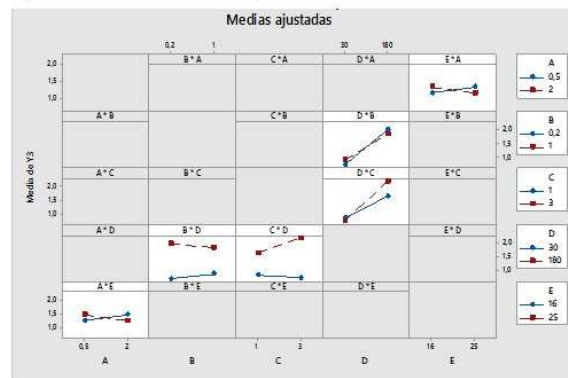


Figura 21. Gráfica de efectos principales e interacción para Y3

Conclusión del análisis de varianza

Considerando los resultados obtenidos del análisis de varianza aplicado a los parámetros Y1 y Y3, donde se obtiene que el mejor rendimiento se da cuando los factores C (tiempo de respiración) y D (tiempo de limpieza) están en nivel alto, y A (cantidad de sustancia) en nivel bajo.

En cuanto al factor B (cantidad de alcohol) se eligió el nivel bajo para evitar un sobre dopaje. Para el factor E (temperatura exterior) se eligió el nivel alto por ser cercano a la temperatura ambiente.

En la Tabla 16, se muestran los niveles de trabajo finales de cada factor.

Tabla 16
Selección del nivel de cada factor para nariz electrónica

Ord	Factor	Pólvora base doble	TNT	Nivel
		Y1	Y3	
1	Cantidad de Sustancia	A^-	A^-	0,5 [g]
2	Cantidad de Alcohol	B^X	B^X	0,2 [ml]
3	Tiempo de Respiración	C^+	C^+	3 [s]
4	Tiempo de Expiración	D^+	D^+	180 seg
5	Temperatura exterior	E^X	E^X	25 °C

3.3.2. Sistema neumático final

Mediante el diseño de experimentos se determinó que la cantidad de sustancia de explosivo es de 0,5 [g] y 0,2 [ml] de alcohol para realizar el dopaje. Además, se redujo el tiempo de cada experimento a 183 [s], distribuidos en 3 [s] para el estado de absorción y 180 [s] para realizar la limpieza.

Considerando que la nariz electrónica va montada sobre el robot móvil y la medición ya no se realiza directamente en los viales se eliminó las 2 electroválvulas para únicamente utilizar 2 bombas.

Se elimina la tubería de 1/8" y se utiliza en todo el sistema neumático tubería 3/8" ya que es el diámetro necesario para el acople de las bombas con la cámara de sensores. Además, se mantiene el caudal de las bombas.

El tamaño de la nariz electrónica con el sistema de instrumentación es de 25x12 [cm] reduciendo notablemente el tamaño en comparación a la nariz electrónica desarrollada por López (2016) que era de 88x26 [cm].

El sistema neumático final y el funcionamiento de las dos etapas se observa en la Figura 22.

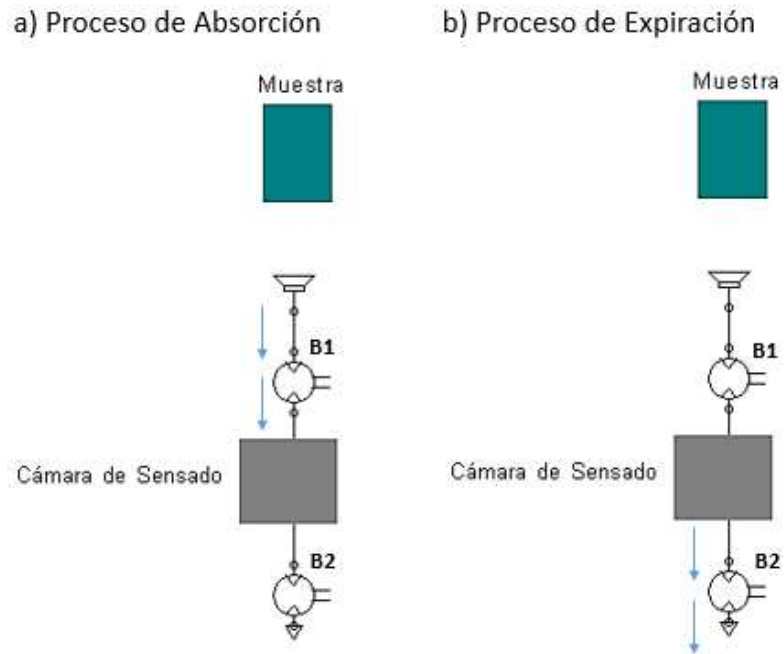


Figura 22. Diagrama neumático final de la nariz electrónica

En la Figura 22(a), se observa que la bomba B1 se enciende y automáticamente empieza el proceso de absorción, una vez que termina el tiempo de absorción se apaga la bomba B1 y se activa la bomba B2 iniciando el proceso de expiración o limpieza como se muestra en la Figura 22(b).

3.4. Optimización bloque de adquisición y procesamiento de datos

En el trabajo desarrollado por López (2016) la adquisición de las señales se lo hacía a través de la tarjeta STMF32F4 y el procesamiento ocurría OFF LINE a través de un computador personal, el requerimiento principal para el presente proyecto es que el procesamiento de la señal sea embebido. Por tal razón se procede a analizar las tarjetas necesarias para la implementación del presente proyecto.

Se puede clasificar a las tarjetas de procesamiento a través de dos grandes grupos:

- Tarjetas de desarrollo con microcontroladores (MCU)
- Tarjetas de desarrollo con microprocesadores (SBC)

En la Tabla 17 se muestran algunas características de los dos tipos de tarjetas.

Tabla 17
Características de SBC y MCU

	Tarjeta de desarrollo con Microcontrolador	Tarjeta de desarrollo con Microprocesador
SIGLAS	Microcontroller (MCU)	Single Board Computer (SBC)
CPU	Capacidad de procesamiento limitada según aplicación	Gran capacidad de procesamiento
Memorias RAM y ROM	Incluida en el mismo circuito integrado	Circuitos externos al microprocesador
Velocidad de Operación	Rápida para aplicaciones sencillas, lenta respecta a SBC.	Rápida
Interferencias	Menos susceptibles a interferencias	Más susceptibles a interferencias
Lenguajes de programación	Dependiente del fabricante	Según sistema operativo instalado en la SBC, más comunes: -C -C++ -JAVA -PYTHON
Lenguaje de programación	Bajo Nivel	Alto Nivel
Manejo de puertos Digitales	SI	SI
Manejo de puertos analógicos	SI	NO

Las tarjetas MCU tienen una gran capacidad para el manejo de periféricos, sin embargo, tienen limitado procesamiento computacional. Las tarjetas SBC son de uso general y tienen por defecto un sistema operativo, además de gozar de una significativa cantidad de memoria RAM, que las vuelve ideales para el procesamiento embebido demandante de recursos computacionales altos.

El presente proyecto requiere del uso de las siguientes características:

- Manejo de entradas y digitales
- Manejo de entradas analógicas

- Distintos tipos de comunicaciones (UART, I2C, WLAN, Ethernet)
- Visión artificial para identificación de objetos.
- Almacenamiento en base de datos.
- Uso de librerías computacionales científicas.

Según los requerimientos se combinan características tanto de MCU como de SBC, volviendo así necesario el uso de dos tarjetas para lograr un correcto funcionamiento caso contrario usando únicamente un tipo de tarjeta no se cumplirán los requerimientos de procesamiento mencionados; por lo tanto, para la elaboración del presente proyecto es necesario el uso de una MCU y una SBC.

3.4.1. Selección de tarjeta de desarrollo

En el presente apartado se elegirá que tipo de MCU y SBC se usará a través de un análisis comparativo entre distintas tarjetas comerciales de desarrollo existentes en el mercado.

Selección tarjeta microcontrolada (MCU)

Para la selección de la tarjeta microcontrolada se realiza un cuadro comparativo entre las tarjetas Arduino DUE y la tarjeta STM32 F4, como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18
Análisis comparativo tarjetas de desarrollo microcontroladas

	Arduino	STM32f4 Discovery
Microcontrolador	AT91SAM3X8E.	ST32F407 VGT6
Tensión de uso	3,3 [V]	5 [V]
Entradas/Salidas Digitales	54	32
Entradas Analógicas (ADC)	12	16
Conversor Digital Análogo	2	2
Resolución ADC	12 bits	12 bits
Memoria Flash	512 Kb	1 Mb
Reloj	84 MHz	168 MHz
Salidas PWM	6	

Características Adicionales	<ul style="list-style-type: none"> - 4 UART - 1 SPI - Comunicación I2C/TWI - Comunicación SPI - 1 CAN 	<ul style="list-style-type: none"> -Unidad Aritmética de coma flotante -Acelerómetro digital - 6 UART - 2 CAN - 3 SPI - 1 Ethernet
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Educativo - Síntesis de audio - Control de procesos - Control de motores - Servo sistemas - Robótica 	<ul style="list-style-type: none"> - Síntesis de audio - Filtros Digitales - Control de procesos - Control de motores - Servo sistemas - Robótica

Tanto Arduino Due como STM32F4 son capaces de:

- Manejar entradas y salidas digitales
- Manejar entradas y salidas analógicas
- Distintos tipos de comunicaciones (UART, I2C, WLAN)
- Conversor Análogo Digital de 12 bits

Las dos tarjetas cumplen con los requerimientos necesarios para su uso sin embargo tienen una diferencia sustancial respecto a su programación, en el trabajo de (López, 2016) la programación de la STM32F4 fue realizada a través de bloques en Simulink de Matlab, que simplifica significativamente el proceso de programación de bajo nivel propio de un microcontrolador, sin embargo para el presente proyecto no se usará MATLAB, dificultando el desarrollo sobre la STM32F4, por esta razón se hará uso de Arduino DUE que brinda una interfaz de programación robusta para los requerimiento del presente proyecto.



Figura 23. Tarjeta Arduino DUE
Autor: (Cetronic, s.f.)

Selección tarjeta microprocesada (SBC)

Para la tarjeta microprocesada en la Tabla 19 se muestra el análisis comparativo entre tres tarjetas.

Tabla 19
Análisis comparativo técnico de distintas tarjetas microprocesadas

	Raspberry Pi 3	BeagleBone Black	PcDuino4
Procesador	1,2 GHz de 64 bits con cuatro núcleos ARMv8	ARM A8 1 Ghz (TI Sitara AM3358)	ARM A7 4 núcleos (Allwinner H3)
Arquitectura	ARM	ARM	ARM
Memoria RAM	1 GB DDR3	512MB DDR3	1 GB DDR3
Conectividad	-USB 2.0 -HDMI 2.0 -Ethernet -WIFI -Bluetooth	-USB 2.0 -HDMI 2.0 -Ethernet	-USB 2.0 -HDMI 2.0 -Ethernet
Sistemas Operativos soportados	- Linux Raspbian (Debian) -Android	-Linux Angstrom -Linux Debian -Android	-Linux Debian -Android
Precio	35 Euros	45 Euros	49 Euros

Uno de los requerimientos mencionados con anterioridad es la conectividad inalámbrica a través de Wireless LAN (WI-FI), Raspberry PI 3 es la única que soporta este tipo de comunicación, el resto de características son similares entre las distintas tarjetas de desarrollo comparadas. Por lo tanto, para el desarrollo del presente proyecto se hará uso de Raspberry PI 3 por soportar comunicación Wireless LAN, Bluetooth; a pesar de no haberse mencionado un agregado importante son las constantes actualizaciones y el soporte brindado de la comunidad tecnológica de Raspberry.



Figura 24. Tarjeta Raspberry PI3
Autor: (Rogers, 2016)

La Figura 25 indica el uso de una MCU para la adquisición de las señales analógicas de los sensores y su conversión a señales digitales, para el procesamiento de estos datos se usará una SBC, esta se realizará el procesamiento de los datos y enviará las señales resultantes al microcontrolador para que este las interprete y accione los actuadores del robot móvil según corresponda.

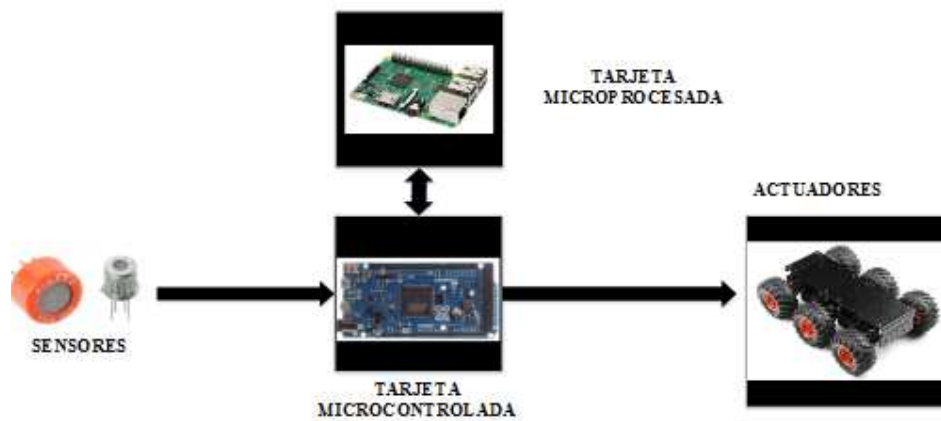


Figura 25. Diagrama de bloques de procesamiento de nariz electrónica

CAPÍTULO 4

PROCESADO DE SEÑAL EN TIEMPO REAL

En el presente capítulo se detallan los algoritmos aplicados al preprocesamiento de las señales, del modelo multivariante para la discriminación de sustancias explosivas. Todos los algoritmos presentados se han embebido a través del uso de Raspberry PI y con el lenguaje de programación Python.

4.1. Software del prototipo inicial

En el proyecto previo de López (2016) el procesamiento de las señales se realizó en Matlab desde un ordenador de manera OFF-LINE, donde se establecieron distintas etapas, las mismas que consisten en:

- Eliminación de la línea base de los sensores: En ausencia de un olor, la respuesta de los sensores tiene un valor referencial distinto de cero y al captar una fuente de olor estos reaccionan; sin embargo, dichos sensores después de la excitación no retornan al valor inicial denominado como línea base, para eliminar esta se procede a estimarla a través de interpolación y a restarla de la señal de cada sensor.
- Suavizado de las señales: Las señales de los sensores se ven afectadas por ruido externo, por lo que se aplicó un filtro Svitzky-Golay para suavizar las señales y así eliminar dicho ruido.
- Alineamiento entre experimentos: Se realiza para corregir los desalineamientos producidos por errores experimentales o factores externos no controlados. López (2016) utilizó el algoritmo icoshift que permite alinear un conjunto de señales mediante una señal de referencia.
- Concatenado de las señales: Se enlazan los datos de los sensores para generar una matriz única donde las filas contienen las muestras y en las columnas las respuestas de cada sensor.
- Creación de un modelo multivalente: Se desarrolló un modelo para la discriminación de TNT y pólvora en base doble que consistió en la

combinación del análisis de componentes principales y análisis lineal discriminante con un clasificador 3NN.

En el presente proyecto se replicará el funcionamiento de López (2017), a diferencia del trabajo citado donde el procesamiento se realizaba OFFLINE, ahora se embebió el funcionamiento para tener una respuesta inmediata, es decir la nariz electrónica ejecutará un ciclo de respiración y expiración e inmediatamente procesa los datos y entrega los resultados de la sustancia detectada.

4.2. Adquisición de las señales

En el Capítulo 3, se determinó el uso de dos tarjetas para el control autónomo de la plataforma robótica:

- Tarjeta Microcontrolada (MCU): Arduino Due, la misma que se encargara de la adquisición de las señales de los sensores y de la activación y desactivación de los actuadores del robot.
- Tarjeta Microprocesada (SBC): Raspberry PI, cuya función es captar los valores enviados mediante el puerto serial desde Arduino Due para realizar el preprocesamiento de las mismas y la clasificación del tipo de sustancia.

En la Figura 26 se observa el diagrama de flujo del algoritmo implementado en el Arduino Due para la adquisición de las señales de los sensores. El algoritmo cuenta con dos subrutinas, la primera se encarga de leer las entradas analógicas de los sensores y preparar estos datos para su transmisión a la Raspberry PI mediante una comunicación serial; la segunda subrutina es una máquina de tres estados que permite iniciar ejecución al recibir el carácter especial 'b'. El "ESTADO 1" realiza una espera de 2000ms y pasa al "ESTADO 2", donde se activa la bomba (B1) para realizar el ciclo de respiración en un experimento, al terminar pasa al "ESTADO 3" que activa la bomba (B2) para el ciclo de limpieza. Cabe recalcar que estas dos subrutinas están ejecutándose simultáneamente para que los valores de los sensores siempre sean actualizados correctamente.

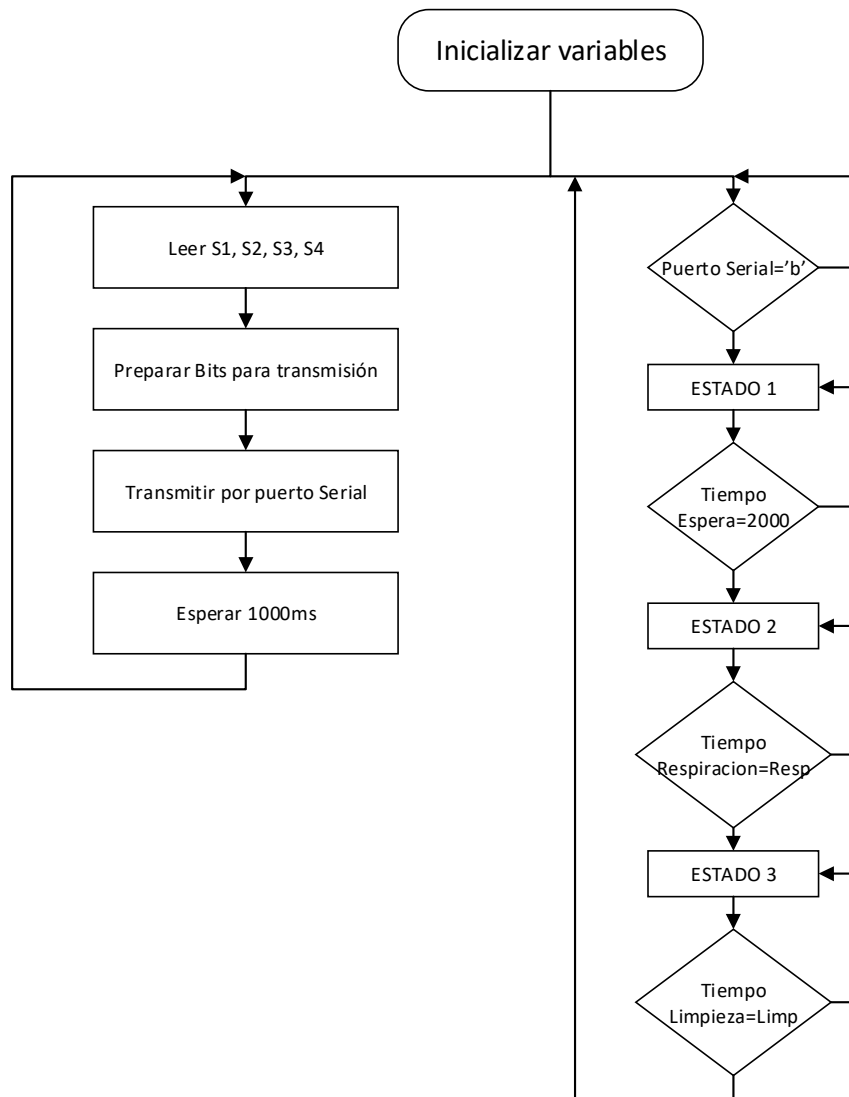


Figura 26. Diagrama de flujo tarjeta Arduino Due

La tarjeta Raspberry PI está programada para captar y verificar los datos enviados por puerto serial desde Arduino Due. La Figura 27 muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado en la tarjeta Raspberry PI. Se inicializan las variables, se establece la comunicación serial y se procede a limpiar el buffer del puerto serial.

La Raspberry PI envía un bit de inicio al Arduino Due para ejecutar la nariz electrónica e inmediatamente empieza a leer la trama tantas veces como muestras se han de analizar; en el caso que una trama llegue y presente errores de transmisión se elimina la misma, caso contrario cada muestra se almacena en la base de datos. Al

concluir la recolección de datos se continúa con el suavizado, eliminación de la línea base y concatenación de las señales.

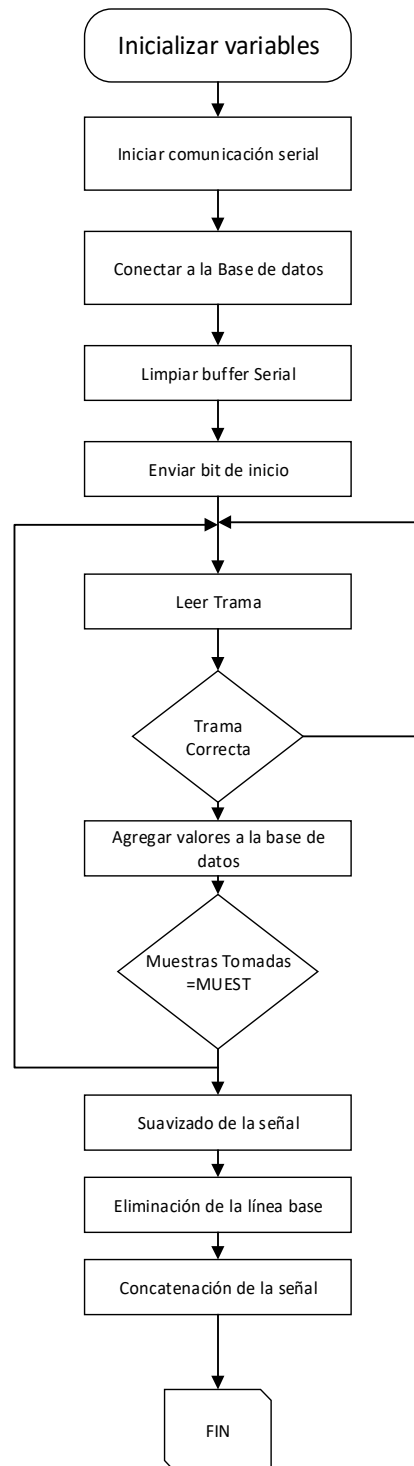


Figura 27. Diagrama de flujo tarjeta Raspberry PI

4.3. Preprocesamiento de las señales

4.3.1. Suavizado de la señal

Para realizar el suavizado de la señal se usó un filtro de mediana móvil que en base al cálculo de la mediana del conjunto de datos vecinos genera una nueva señal, logrando suavizar el ruido de los datos. Una desventaja de este filtro es que no es lineal sin embargo tiene buenos resultados al suprimir picos generados por ruido (Villar Sebastian A., 2014).

La Figura 28 muestra la señal procedente del sensor TGS 822 aplicado un filtro de mediana de orden seis, el cual garantiza que el pico de la señal no se reduzca.

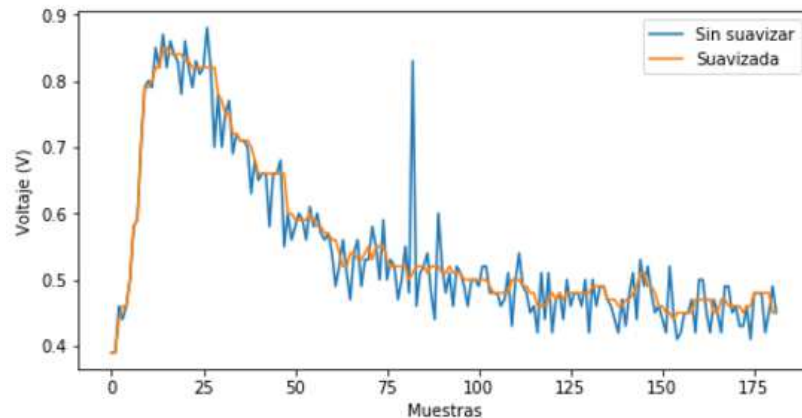


Figura 28. Señal suavizada con filtro de mediana móvil

La Figura 29 muestra las señales de los cuatro sensores de la nariz electrónica y las mismas señales con el filtro de mediana de orden seis.

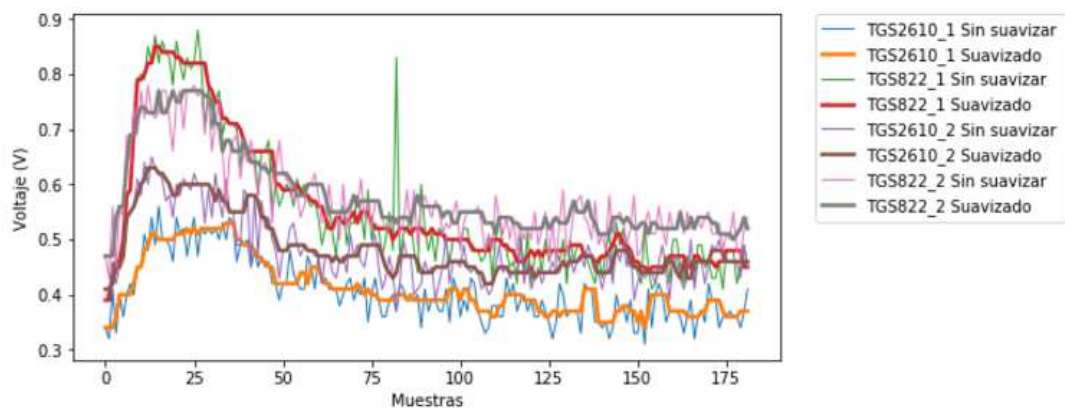


Figura 29. Señales de los cuatro sensores posterior a suavizado

4.3.2. Estimación y eliminación de la línea base

Los sensores de la familia TGS de Figaro tienen una característica especial, estos tienen una línea base dependiente de las señales del ambiente, la misma que varía en cada experimento. En la presente sección se desarrollará un algoritmo para determinar la línea base y su posterior eliminación.

Para la estimación de la línea base se calcularon los máximos y mínimos relativos de las señales, para encontrar una curva que se ajuste a la evolución de la línea base a lo largo del experimento. Finalmente, se sustrae la línea base de la señal original del sensor.

A continuación, se definen los pasos necesarios para la eliminación de la línea base de los sensores:

- **Cálculo de los máximos relativos de cada sensor**

Sabiendo que un máximo es un punto de inflexión, por lo tanto, la pendiente será distinta, en valores previos y posteriores. Se procedió a crear un bucle que recorra todos los elementos de las muestras de cada sensor, procurando que se cumpla la condición que dos muestras anteriores y posteriores al punto de interés sean menores al punto actual. La Figura 30 indica la obtención de puntos máximos de la señal captada por uno de los sensores de la nariz electrónica.

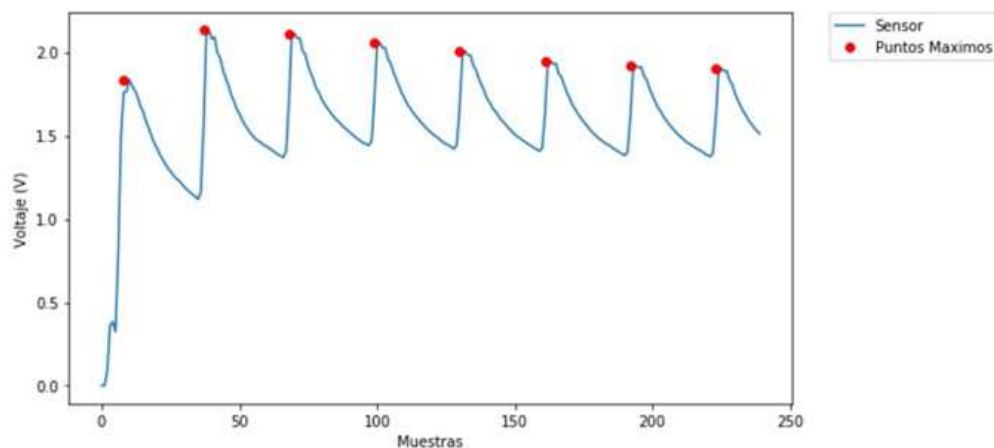


Figura 30. Señales de máximos de los sensores.

- **Calcular los mínimos relativos de cada sensor**

Para la obtención de los mínimos de cada señal se procede a realizar un algoritmo iterativo, debido a que entre dos máximos debe existir un mínimo absoluto, como se muestra en la Figura 31, donde los puntos máximos están representados con puntos rojos mientras los puntos mínimos con puntos verdes, se aprecia visualmente que entre dos puntos máximos necesariamente existe un mínimo.

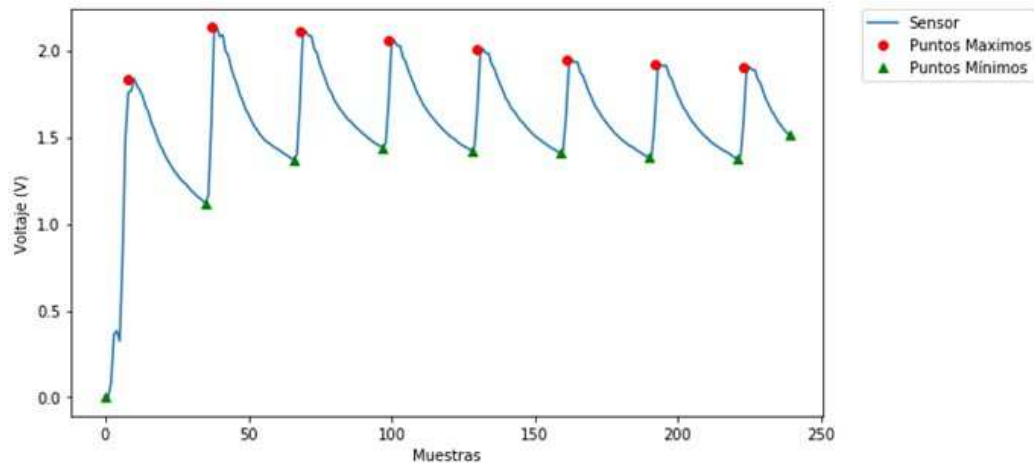


Figura 31. Obtención de los valores mínimos de cada sensor

La Figura 32 indica la obtención de los puntos máximos y mínimos de cada sensor de la nariz electrónica con las condiciones de experimentación concluidas en el Capítulo 3, que indican 3 [s] de respiración y 180 [s] de limpieza o expiración, también se puede apreciar que dichas señales tienen ruido externo que apareció al implementar la nariz electrónica sobre la plataforma móvil.

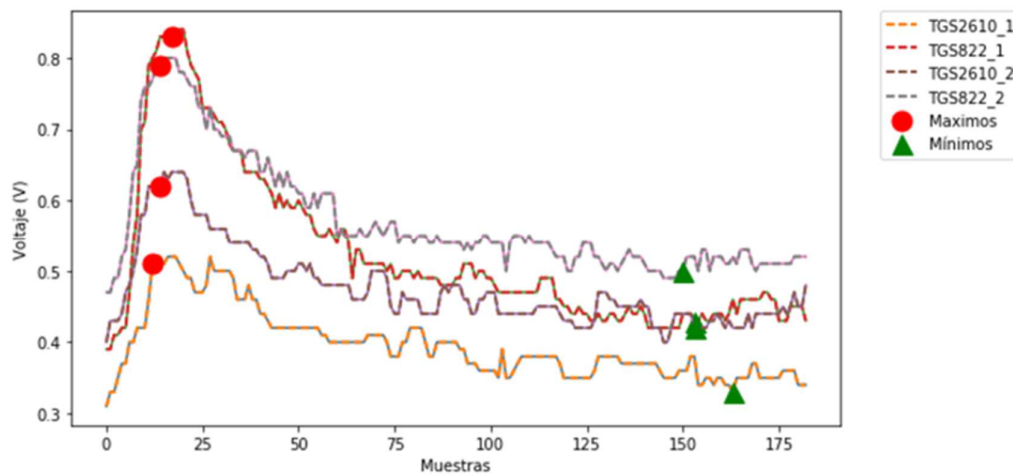


Figura 32. Puntos máximos y mínimos en condiciones finales

- **Determinación de la línea base**

Obtenidos los mínimos se procede a obtener las curvas de ajuste de cada uno de los sensores, a través de un ajuste polinómico de orden cuatro con los puntos mínimos captados por cada sensor, el resultado de la obtención del ajuste se muestra en la Figura 33.

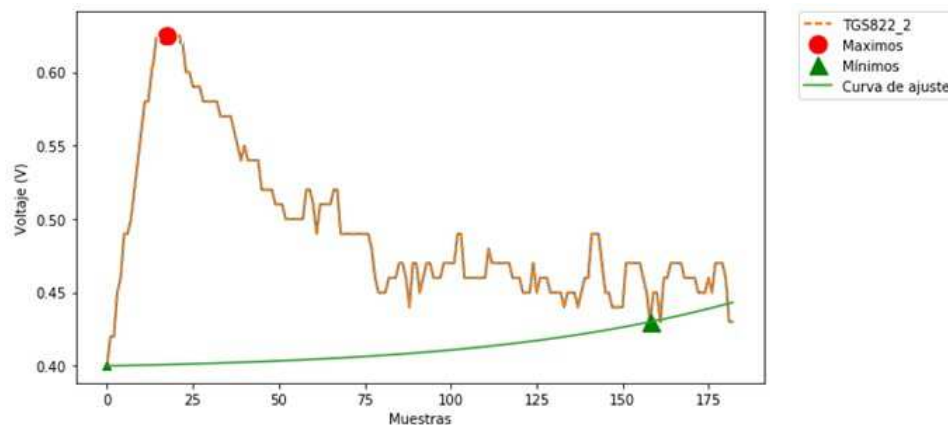


Figura 33. Obtención de la curva de ajuste de los puntos mínimos

Finalmente, se procede a restar la curva original menos el ajuste polinómico de orden cuatro, obteniendo el resultado de la Figura 34, donde se muestra la respuesta original del sensor, así como el ajuste de los puntos mínimos, y la gráfica con la respectiva eliminación de la línea base.

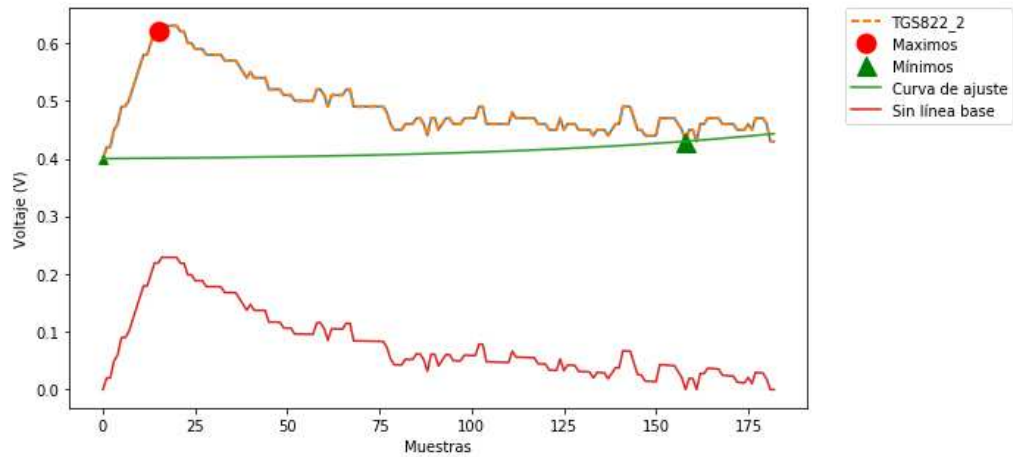


Figura 34. Eliminación de la línea base de la señal de la nariz electrónica

4.3.3. Concatenamiento y alineación

Una matriz de n sensores con m muestras se procede a transformar en un vector fila de $n \times m$ muestras. En el caso del presente experimento se procede a ubicar la respuesta de cada sensor sin línea base, una a continuación de la otra, tal como se muestra en la

Figura 35, la nariz electrónica consta de cuatro sensores cada uno con 183 muestras al concatenarlas se convierte en un vector de 783 muestras.

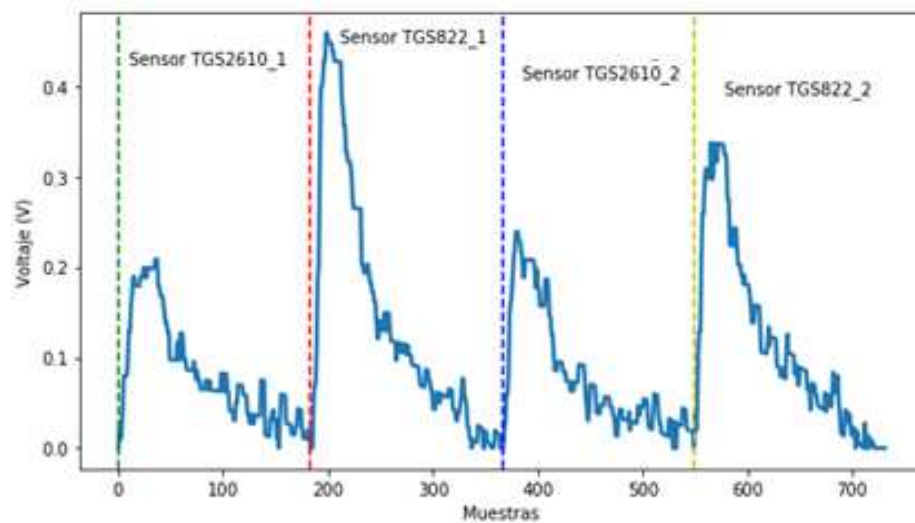


Figura 35. Respuesta de los sensores concatenados

Se puede observar en la Figura 36 un total de 64 experimentos que se han realizado para la construcción del modelo de discriminación, por condiciones de experimentación todas las señales se encuentran correctamente alineadas, debido a que se inicia con 3 [s] de respiración y los 180 [s] de limpieza.

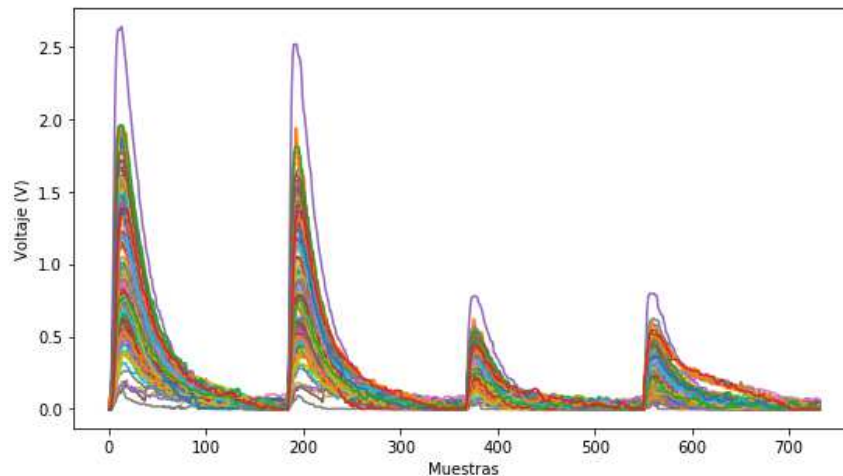


Figura 36. Respuesta de sensores en varios experimentos

4.4. Modelo de discriminación de sustancias

En esta sección a través de experimentación se construyó un modelo que permita discriminar entre tres tipos de sustancias, alcohol, TNT y pólvora, a través de esto se pretende reproducir el trabajo realizado por López (2016), que consiste en la creación de un modelo multivariante para la discriminación de esas sustancias, pero además en el presente proyecto se pretende embeber dicho modelo para la identificación de la sustancia de interés en línea, para la construcción del modelo multivariante se ha realizado 64 experimentos

4.4.1. Análisis de componentes principales (PCA)

El análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), es una de las herramientas estadísticas más utilizada para la reducción de dimensionalidad de un conjunto de datos multivariante. Inicialmente fue desarrollado en 1901 por K. Pearson (1901), (Peña, 2003), De manera general PCA es una técnica de reducción de dimensionalidad es decir se reducirá la cantidad de variables de un conjunto de datos perdiendo la menor cantidad de información relevante posible (López, 2016).

El PCA forma parte de los algoritmos de aprendizaje no supervisado, realiza una transformación a un nuevo conjunto de variables denominado de componentes principales, a cambio de una pequeña pérdida de información (Gurrea, 2016).

En otras palabras, es que dado un espacio con P muestras en N experimentos, a través del PCA se proyectan los datos a un nuevo subespacio que tiene una menor cantidad de variables, está construido en base a combinaciones lineales de los elementos del espacio original, el nuevo subespacio conserva la información más importante de los datos. Dicha transformación lineal se basa en el cálculo de valores y vectores propios.

$$X = \sum_{a=1}^P t_a p_a^T + E \quad (15)$$

En la Ecuación (15) se indica la ecuación que describe el PCA, que está compuesto por X es la matriz de datos (N experimentos con P muestras cada uno), t representa los *scores* que son vectores resultante de proyectar los datos en el nuevo subespacio (N experimentos con Pa componentes principales), y p representa los *loadings* que son vectores resultantes de la combinación de las características originales proyectadas en este nuevo subespacio (Pa componentes principales x P características).

En este ejemplo sencillo es fácil notar que el primer componente principal está en la dirección de máxima varianza de los datos, y el segundo componente principal es ortogonal al PC1. De esta manera al representar los datos en este nuevo subespacio la varianza de los datos es paralelo al PC1.

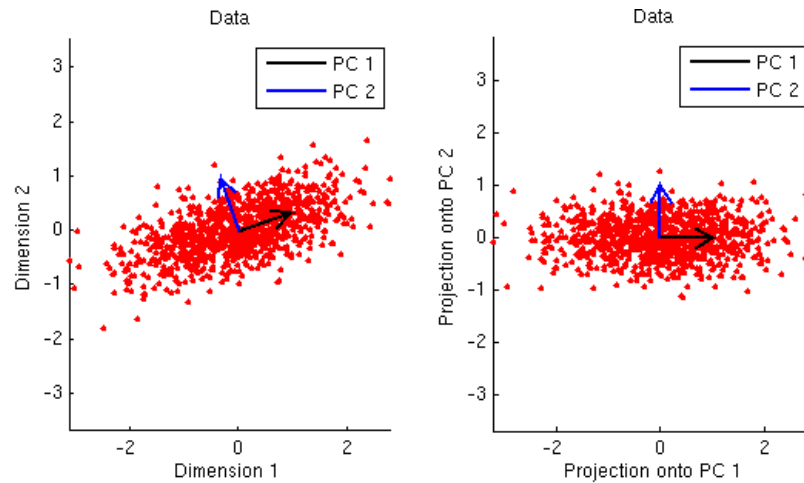


Figura 37. Resultado de PCA

Fuente (Kay, 2012)

El proceso necesario para poder realizar en análisis de componentes principales (PCA) está compuesto de los siguientes pasos:

1. Obtener la media de los datos.
2. Restar la media al conjunto de datos.
3. Calcular la matriz de covarianza de los datos.
4. Obtener los valores propios y vectores propios de matriz de covarianza.
5. Ordenar los vectores propios de mayor a menor.

4.4.2. Análisis discriminante lineal (LDA)

Este es una generalización de la discriminación lineal de Fisher, este método se usa ampliamente en estadística, reconocimiento de patrones para encontrar una combinación lineal de características dos o más clases de objetos o eventos. La combinación resultante suele ser usada como un clasificador lineal, o más comúnmente para reducción de dimensionalidad previo a la clasificación (W. Zhao, 1998). Al mismo tiempo son usados para la reducción de dimensionalidad igual al número de clases menos uno, los LDA son un algoritmo de aprendizaje supervisado ya que usan información de las clases, para la correcta aplicación de esta técnica es necesario que el número N de experimentos debe ser mayor a la cantidad P, de no ser

así se producirá un modelo sobre ajustado que se adecuará bien a los datos de entrenamiento, pero no será capaz de describir datos futuros.

Los LDA producen una función de discriminación lineal $f(x) = W^T x$, que mapea la entrada en un espacio de clasificación, $f(x)$ es la combinación lineal del conjunto de datos x . Se procede a estimar las matrices de dispersión S_B y la matriz de dispersión entre clases S_W .

$$S_B = \sum_c (\mu_c - \bar{x})(\mu_c - \bar{x})^T \quad (16)$$

$$S_W = \sum_c \sum_{i \in c} (x_i - \mu_c)(x_i - \mu_c)^T \quad (17)$$

Para optimizar la siguiente función donde W es la discriminación óptima de discriminación.

$$J(w) = \frac{||w^T S_B w||}{||w^T S_W w||} \quad (18)$$

4.4.3. Generación del modelo

Se realizaron un total de 154 experimentos para la generación del modelo colocando la plataforma móvil próxima a las sustancias de interés como se indica en la Figura 38, dichos experimentos se realizaron cada 5 [min] aleatoriamente, para la generación del modelo se usó un total de 64 experimentos mientras que para la validación se usaron 90 experimentos.

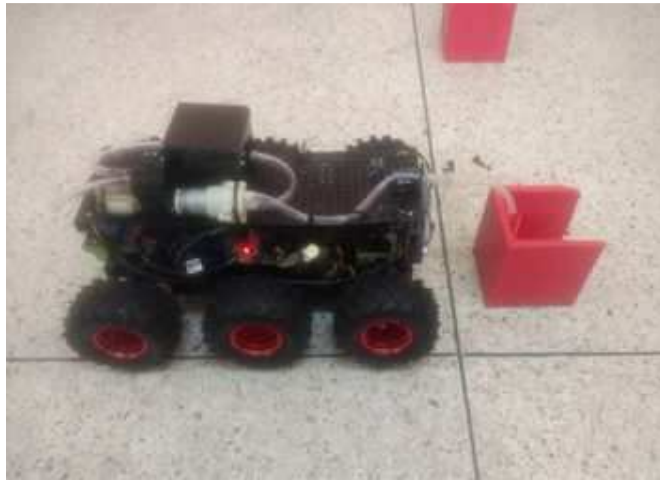


Figura 38. Ejemplo de experimentación sobre las sustancias de interés

Para la generación del modelo de discriminación se hace uso de análisis de componentes principales (PCA) y del uso del análisis de discriminación lineal (LDA). Para la aplicación del PCA se usó una matriz formado por 64 experimentos y cada uno con 783 muestras, dicha matriz esta graficada en la Figura 36, para la implementación de estas técnicas estadísticas se hizo uso de la API Scikit-learn para Python.

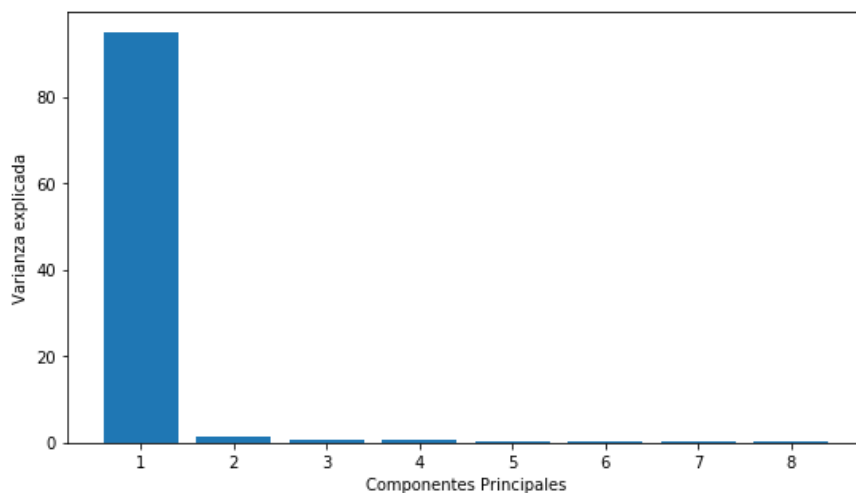


Figura 39. Varianza explicada de las componentes principales del PCA

Al observar la Figura 39 que indica la varianza explicada resultante del PCA se visualiza que la primera componente capta más del 80% de la varianza de los datos,

de allí se observa que la contribución de cada componente es menor al 5%, al usar las primeras ocho componentes principales se captura el 94,48% de la varianza de los datos.

En la Figura 40 se puede observar el resultado de la aplicación del PCA a los datos de entrenamiento, sin embargo, en el PCA las regiones de TNT, Pólvora, Alcohol se superponen entre sí, dificultando una correcta clasificación, además se identifican dos outliers, que pueden ser resultado de condiciones experimentales incorrectas.

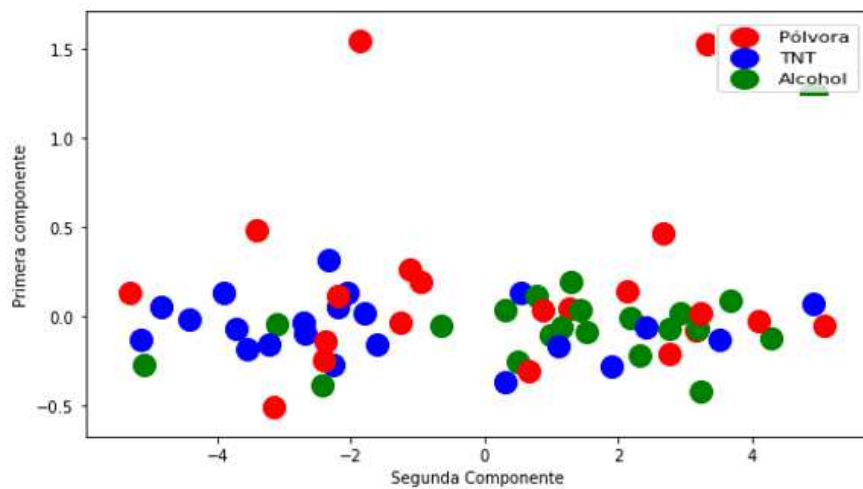


Figura 40. Modelo PCA

Por lo tanto, se aplicará también un análisis de LDA a los datos. La Figura 41 indica el resultado del modelo mediante el uso del LDA, se puede observar que existe una mayor separación entre las clases.

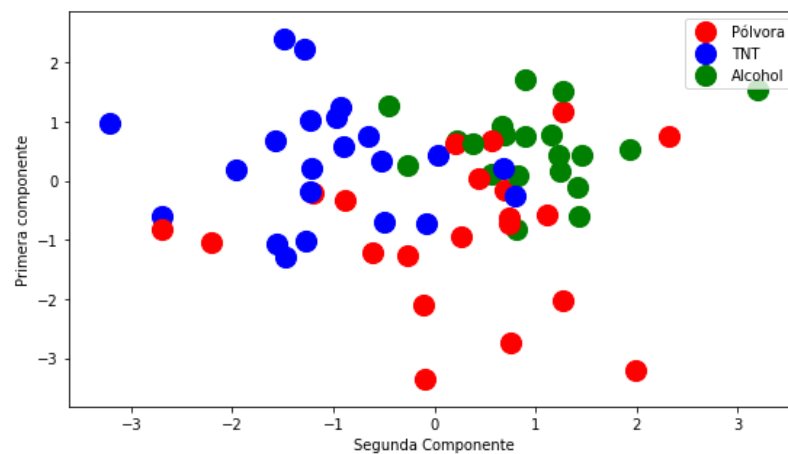


Figura 41. Modelo LDA

Sobre el modelo visualizado en la Figura 41 se procede a aplicar un clasificador de K vecinos más cercanos. Para encontrar el orden del clasificador se procedió a encontrar el parámetro K, el procedimiento de optimización consistió en variar el orden del clasificador de vecinos más cercanos y verificar para que valor existe un mayor porcentaje correcto de clasificación, acorde a la Figura 42 se observa existe un alto porcentaje de clasificación para $K= 11, 12$.

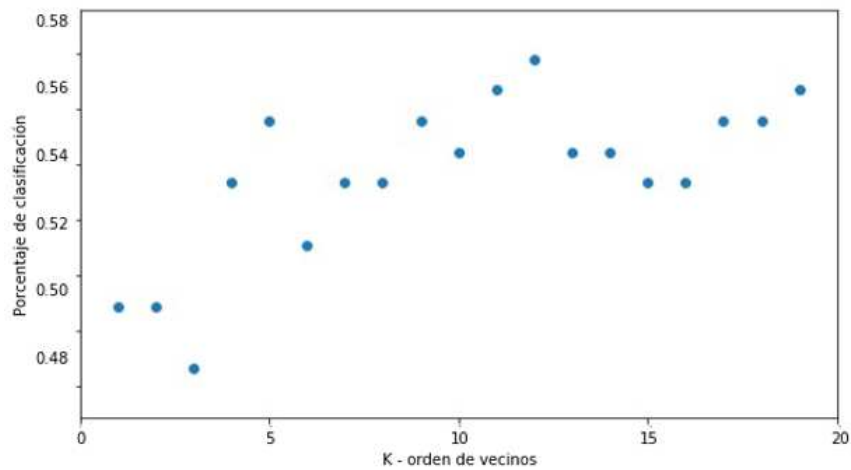


Figura 42. Optimización del orden del clasificador de vecinos más cercanos

La Figura 43 indica las zonas de clasificación al aplicar un clasificador de K vecinos más cercanos de orden 12, este clasificador tiene la ventaja de establecer regiones no lineales para la clasificación.

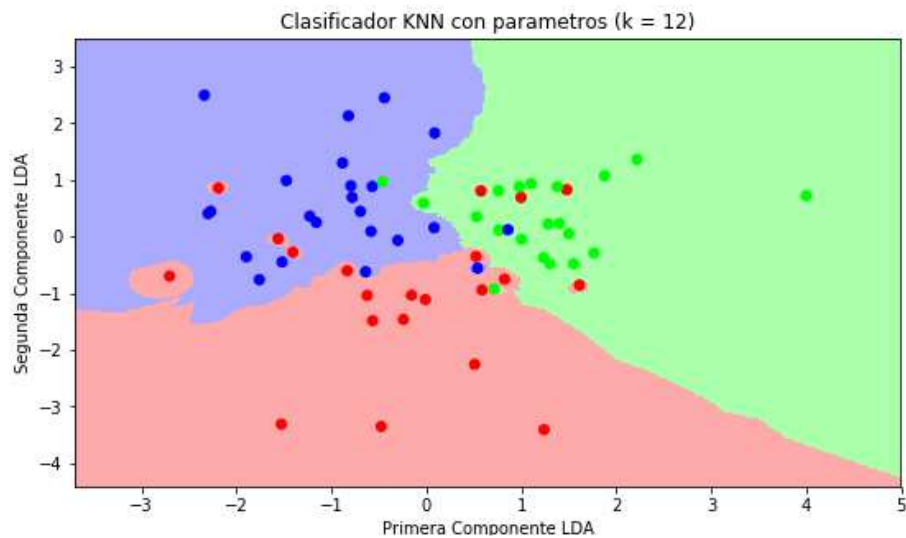


Figura 43. Fronteras de clasificación resultante

Para la validación del modelo se ha usado los datos de 90 experimentos teniendo un porcentaje de clasificación de 54%, la Figura 44 indica la proyección de los experimentos de validación, un símbolo está correctamente clasificado si solo si está en la región de clasificación de mismo color, es notable que la mayor cantidad de errores se presentan con la pólvora

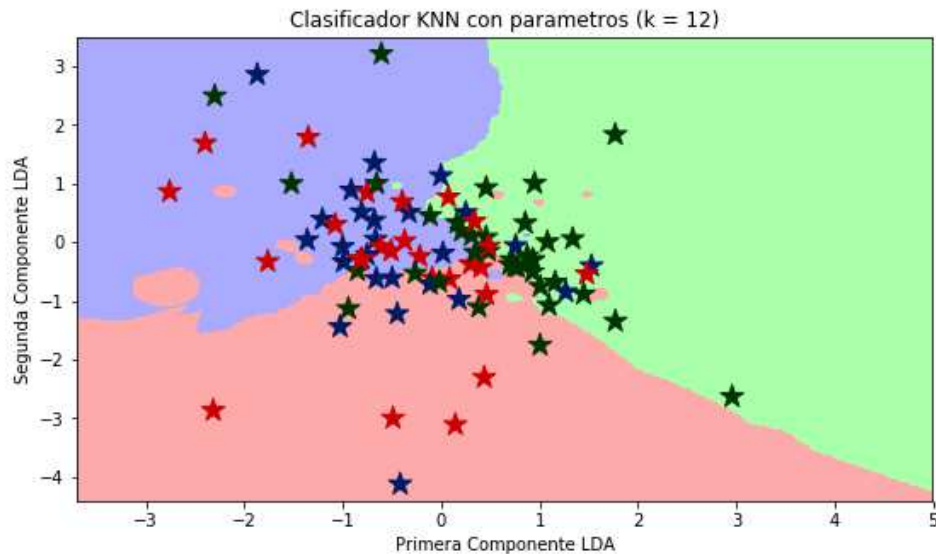


Figura 44. Validación del modelo

4.5. Embeber los algoritmos de procesamiento

En el trabajo realizado por López (2016), el procesamiento de los datos de la nariz electrónica se lo realizaba OFF-LINE, en el actual trabajo se embebió todo el procesamiento, permitiendo que la nariz electrónica sea autónoma y no necesite de un ordenador.

La Raspberry PI cuenta con el sistema operativo Raspbian que es una derivación de Linux Debian, dicho sistema se ha reprogramado para la arquitectura ARM y sus distribuciones poseen por defecto el software Python 2.7, que es un lenguaje de programación de propósito general y cuenta con una serie librerías que lo hacen versátil para el manejo, integración e implementación de algoritmos. Además, Python 2.7 es Open Source una gran ventaja frente a Matlab por lo que es capaz de manejar largos conjuntos de datos, la sintaxis de programación y su estructura obliga a mantener un código ordenado y simple de entender. (Rogers, 2016)

Para lograr embeber el procesamiento en la Raspberry PI se usó una serie de librerías que se detallan en la Tabla 20, para evitar la instalación individual de cada una de ellas se instaló Anaconda, que es una suite que contiene todas las librerías necesarias para el correcto funcionamiento de Python como plataforma de data Science.

Tabla 20
Librerías usadas para embeber los algoritmos de procesamiento

Librería	Descripción
Numpy	Permite manipular arreglos o matrices de datos, y distintas operaciones de cálculo numérico
SciPy	Permite el uso de distintos algoritmos de manipulación numérica
Sci Kit Learn	Librería que cuenta con distintas funciones y módulos para el uso de algoritmos de Machine Learning.
Matplotlib	Librería usada para generar gráficos de los distintos procesamientos que se han realizado a los datos
Pandas	Librería usada para la estructuración de datos
IPython	Terminal interactivo para la ejecución de programas en Python

La generación de los algoritmos de preprocesamiento y de discriminación de sustancias se lo realizó OFF-LINE en Python bajo con el uso de Jupyter (IPython) y de todas las librerías mencionadas con anterioridad, los modelos resultantes del uso de PCA, LDA, y del clasificador KNN se almacenan como archivos con extensión “.cacv”, de tal manera que existen tres archivos:

- Pca.cacv
- Lda.cacv
- Knn.cacv

Dichos archivos se proceden a cargar en la Raspberry PI3 ya que serán necesarios para el procesamiento Online.

En la Figura 45 se indica el proceso seguido para embeber los algoritmos de procesamiento en la Raspberry PI montada sobre la plataforma móvil.

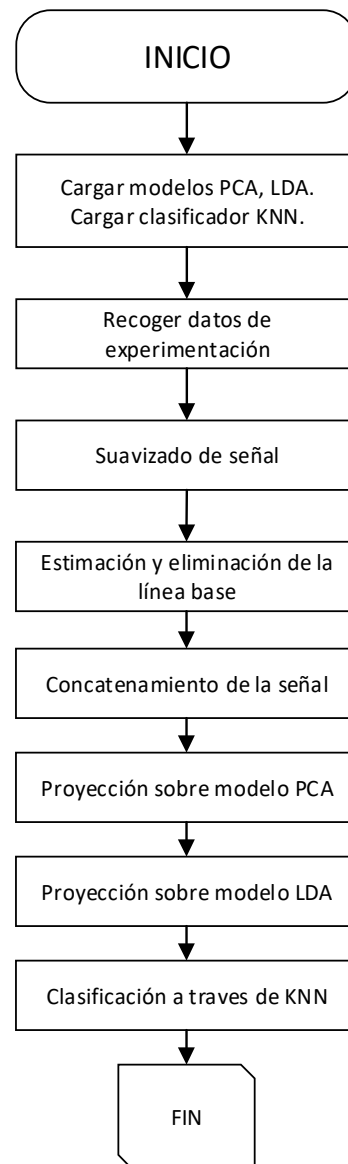


Figura 45. Diagrama de flujo de algoritmos embebidos

Se cargan los modelos previamente entrenados OFFLINE, cuando se recogen datos de experimentación ONLINE es necesario que estos sean pre-procesados previo a proyectarlos y clasificarlos, como ya se mencionó todos los algoritmos programados OFFLINE fueron realizados en Python por lo tanto se puede ejecutarlos sin necesitar ninguna modificación, posterior al concluir el preprocesamiento se procede a la

reducción de dimensionalidad y la proyección sobre el modelo LDA y su clasificación mediante el algoritmo de vecinos más cercanos.

4.6. Almacenamiento de datos

Para almacenar los datos de experimentación como de validación del modelo se hace uso de una base de datos relacional MySQL que se instaló en Raspberry PI y en la cual a través de Python se guarda toda la información adquirida de los sensores de nariz electrónica.

La Figura 46 indica las dos tablas de una base de datos usadas para almacenar los distintos datos recogidos de los sensores de la nariz electrónica.

Table Name	Column Name	Data Type
experimentacion	experimento	int(11)
	num	int(10) unsigned
	S1	double
	S2	double
	S3	double
	S4	double
experimenta	num	int(10) unsigned
	S1	double
	S2	double
	S3	double
	S4	double

Figura 46. Tablas de la base de datos para almacenar datos

- Tabla “Experimentación”

Esta tabla ha sido usada para recoger todos los experimentos necesarios para la generación del modelo de discriminación.

- Experimento: Indica el número del experimento realizado
- Num: Indica el número de muestra cada experimento, de manera general por cada experimento existe una cantidad de 183 muestras
- S1: Almacena el valor del sensor TGS2610_1
- S2: Almacena el valor del sensor TGS822_1
- S3: Almacena el valor del sensor TGS2610_2
- S4: Almacena el valor del sensor TGS822_2

- Tabla “Experimenta”

Esta tabla se usó para validar los experimentos y para el uso de la nariz electrónica en línea.

- Num: Indica el número de muestra cada experimento, de manera general por cada experimento existe una cantidad de 183 muestras
- S1: Almacena el valor del sensor TGS2610_1
- S2: Almacena el valor del sensor TGS822_1
- S3: Almacena el valor del sensor TGS2610_2
- S4: Almacena el valor del sensor TGS822_2

CAPÍTULO 5

MONTAJE Y NAVEGACIÓN EN EL SISTEMA ROBÓTICO

En este capítulo se detalla el acondicionamiento y montaje de la nariz electrónica y las etapas de control y potencia sobre el robot móvil “Dagu Wild Thumper 6WD”, de una manera compacta y funcional. Además, se integró el algoritmo de navegación a la etapa de control, para que junto con el sistema de identificación de la nariz electrónica pueda discriminar entre las sustancias explosivas de TNT y la Pólvora base doble.

5.1. Montaje y acondicionamiento de la plataforma robótica con la nariz electrónica

Considerando que en trabajos previos desarrollados por Gaibor y Mediavilla (2016) y en Arias (2017) ya se utilizó el robot “Dagu Wild Thumper 6WD” (ver Figura 1). Esta plataforma robótica permite soportar una carga de hasta 6 [kg], estructura de fácil montaje, movilidad en todo terreno, voltaje nominal de 2,5V – 7,5V y una corriente de cada motor sin carga de 350 [mA]. (DAGU, 2013). Por lo tanto, en el presente trabajo se continuará usando dicho robot.

En el trabajo de titulación de Arias (2017) ya se realizó un acondicionamiento y montaje de elementos sobre el robot, como se muestra en la Figura 47.

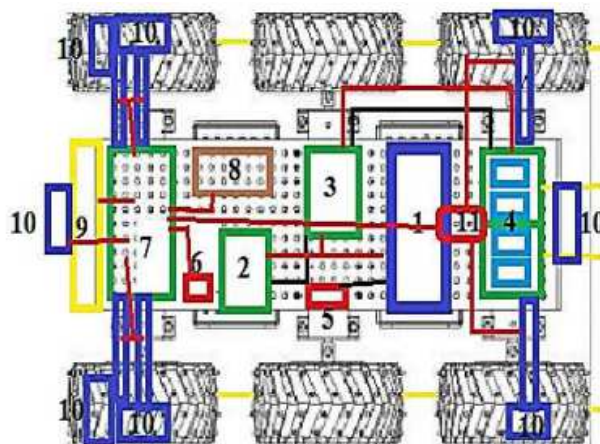


Figura 47. Esquema general dónde: (1) Batería LIPO, (2) Conversor DC-DC, (3) Driver motor DC, (4) Módulo 4 relés, (5) Switch ON/OFF, (6) Compás electrónico, (7) Arduino DUE, (8) Servomotor, (9) Arreglo de sensores químicos, (10) Sensores ultrasónicos y (11) módulo RF

Autor: (Arias, 2017)

La distribución de dichos elementos en las etapas de potencia, control y visión artificial se muestran en la Tabla 21, junto con algunas de sus características.

Tabla 21
Acondicionamiento del robot “Dagu Wild Thumper 6WD”

Etapa/Bloque	Elementos	Características Técnicas	
Etapa de Potencia	3 baterías LIPO	7,4 [V]	2,5 [A] c/u
	Driver motor DC	6 -30 [V]	8 [A]
	2 conversor DC-DC LM2596S	2,5 -10 [V]	3 [A]
	1 módulo de 4 relés	220 [V]	10 [A]
Etapa de Control	1 microcontrolador Arduino DUE de 32 bits	5 [V]	300 [mA]
	Módulo RF APC220	5 [V]	200 [mA]
	8 sensores ultrasónicos hc-sr04	5 [V]	250 [mA]
	6 sensores químicos MQ	5 [V]	300 [mA]
	Compás electrónico GY-271	5 [V]	200 [mA]
	Servo motor	5 [V]	300 [mA]
Etapa de visión artificial	Cámara inalámbrica WIFI	5 [V]	500 [mA]

Autor: (Arias, 2017)

Las 3 baterías LIPO de dos celdas de 7,4 [V] 2500 [mA] se conectaron en paralelo para así obtener 7,4 [V] y 7,5 [A]; la corriente generada por el hardware, cámara y de cada motor es de 3,6 [A], por lo tanto, otorga una potencia total de 55,5 [W] y suministraba al dispositivo móvil una operatividad aproximada de 2 horas. (Arias, 2017)

Para el desarrollo del presente proyecto se mantuvieron todos los elementos de la etapa de potencia, sin embargo, para la etapa de control se quitó la matriz de los seis sensores químicos que estaban ubicados en la parte frontal del robot en vista que la cámara de sensores de la nariz electrónica suple su función. Para la etapa de visión artificial se reemplazó la cámara wifi por una FaceCam como soporte en la navegación del robot. Para facilitar el acople de la nariz electrónica algunos componentes se cambiaron de posición, pero las conexiones de los elementos se mantuvieron en su totalidad. (ver Anexo A)

En la Tabla 22 se detallan los componentes utilizados para el acondicionamiento de los bloques de la nariz electrónica: medición, neumático y de adquisición; al igual que los componentes requeridos para la etapa de potencia.

Tabla 22
Acondicionamiento de la nariz electrónica en el robot móvil

Etapa/Bloque	Elementos	Características Técnicas	
Etapa de Control	GENIUS FaceCam-320	5 [V]	200 [mA]
Etapa de Potencia	1 convertor DC-DC LM2587S	2,5 – 10 [V]	3 [A]
	1 Arduino Shield módulo de 4 relés	220 [V]	10 [A]
	1 regulador de voltaje LM7805	5 [V]	300 [mA]
Bloque de Medición	2 sensores químicos TGS822	< 24 [V]	<15 [mW]
	2 sensores químicos TGS2610	5 [V]	<15 [mW]
Bloque Neumático	2 bombas	12 [V]	1.5 [A]
Bloque de Adquisición	1 Raspberry PI 3 de 1,2Ghz de 64 bits	5 [V]	200 [mA]

Para calcular el consumo nominal del robot móvil se tomó en cuenta que valor de la corriente estimada en el trabajo de Arias (2017) descartando los componentes retirados es de 2,8 A, a este se suma la corriente del hardware y las dos bombas que es de 2,2A, por lo que el cálculo de consumo de energía del robot móvil responde a la Ecuación (19)

$$Tiempo\ de\ uso = \frac{Corriente\ Fuente}{Corriente\ Carga} \quad (19)$$

$$Tiempo\ de\ uso = \frac{7.5A}{2,8A + 2,2A} = 1,5$$

$$Tiempo\ de\ uso = 1\ hora\ 50\ min$$

Como se puede observar el tiempo de uso del robot móvil es de 1h 50min, por lo que la operatividad del robot cumple para la ejecución del proyecto.

Sabiendo que el robot móvil posee dos niveles (inferior y superior) se realizó el montaje de los elementos, considerando que los de la etapa de potencia se adecuen en el nivel inferior mientras que los elementos de la etapa de control y de los tres bloques de la nariz electrónica sean en el nivel superior.

Por lo tanto, el convertidor DC-DC LM2587S y el Regulador de Voltaje 5 [V] se ubicaron en el segundo compartimiento del nivel inferior (ver Figura 48b); el módulo de cuatro relés se colocó al reverso del nivel superior por no existir más espacio en el

nivel inferior y la FaceCam perteneciente a la etapa de control se ubicó en la parte frontal del nivel superior ya que servirá para la identificación y navegación hacia los objetos sospechosos. La ubicación de estos se muestra en la Figura 48a.

La cámara de sensores conjuntamente con las bombas que son los elementos de bloque de medición y neumático respectivamente se colocaron en el adverso del nivel superior (ver Figura 48a); la tarjeta Raspberry PI (bloque de adquisición) se la instaló en el reverso del nivel superior junto al módulo de relés como se observa en la Figura 48a.

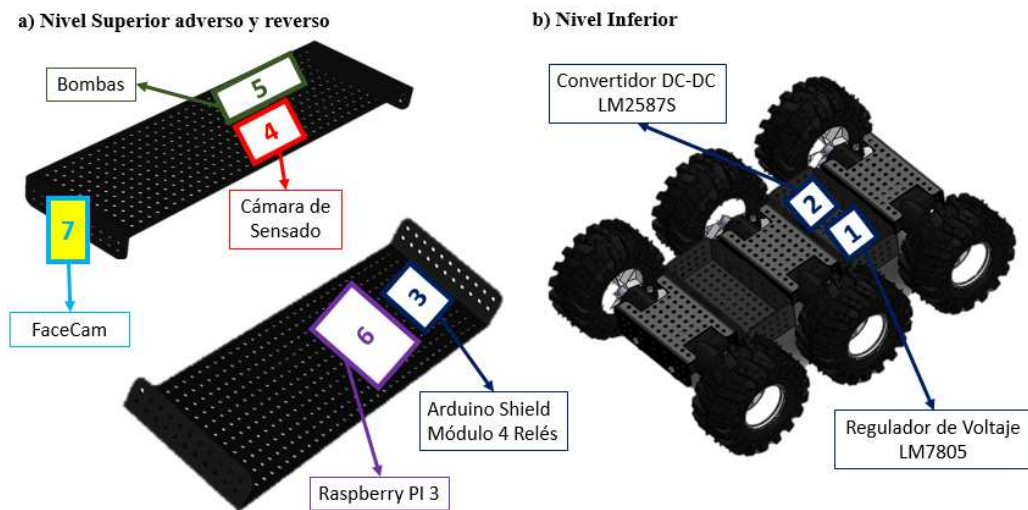


Figura 48. Montaje de los elementos sobre el robot móvil

La conexión y comunicación entre las etapas (Control y Potencia) y bloques (Medición, Neumático y Adquisición) se realizan de forma modular, por contar con su propia instrumentación electrónica.

5.1.1. Acondicionamiento de la etapa de potencia y control

La etapa de potencia es la encargada de proporcionar el voltaje y corriente necesaria a cada uno de los componentes electrónicos que integran la etapa de control y los bloques de la nariz electrónica. La etapa de potencia tiene los siguientes elementos:

- Arduino Shield módulo de 4 relés
- Conversor DC-DC LM2587S
- Regular de voltaje LM7805

El regulador de voltaje LM7805 (ver Figura 49), se estableció para asegurar un voltaje de 5 [V] por existir caída de tensión al momento de la activación de las bombas, cuya alimentación se toma directo de las baterías.



Figura 49. Regulador de voltaje LM7805

El convertidor DC-DC LM2587S (ver Figura 50c) es un elevador de voltaje tipo Boost, por lo tanto, aumenta el voltaje de las baterías de 7,5 [V] a 12 [V] que es voltaje necesario para la activación de las dos bombas.

El módulo de 4 relés (ver Figura 50a) posee un conector de cuatro entradas (canales) y alimentación de 5 [V], dicho voltaje proporciona un convertidor DC-DC LM2596S (ver Figura 50b) que se implementó en el trabajo previo de Arias (2017). Posee cuatro relés marca SONGLE con bobinas de 5 [V] y contactos capaces de manejar hasta 10 [A] en 250 [V], cabe mencionar que este módulo acopla la etapa de potencia con la de control.

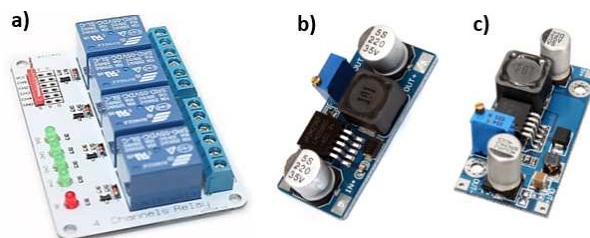


Figura 50. Elementos de la etapa de potencia

Autor: (Cetric, s.f.)

Adicional para la etapa de control se mantiene el uso del Arduino DUE (Figura 23) y un sensor ultrasónico hc-sr04 (ver Figura 51b), ambos necesitan un voltaje de trabajo de 5 [V] que le suministra el regulador de voltaje LM7805. El sensor ultrasónico posee un rango de funcionamiento desde los 2 [cm] hasta los 400 [cm] con un ángulo de inclinación no mayor a los 15 grados y una frecuencia de trabajo de 40 [Hz], está ubicado en el nivel inferior en su parte frontal, como se observa en la Figura 53.

El microcontrolador Arduino DUE se base en tecnología Atmel ARM de 32 bits con 84 MHz en velocidad de reloj, posee una memoria flash de 512 KB y SRAM de 96 KB, y se encuentra ubicado sobre la plataforma inferior en la parte posterior.



Figura 51. Elementos de la etapa de control
Autor: (Cetriconic, s.f.) (Genius, 2017)

En la Figura 52 se muestran las conexiones al Arduino DUE, donde los pines A8, A9, A10 y A11 son para los sensores químicos y los pines 9 y 10 para los canales del módulo de relés.

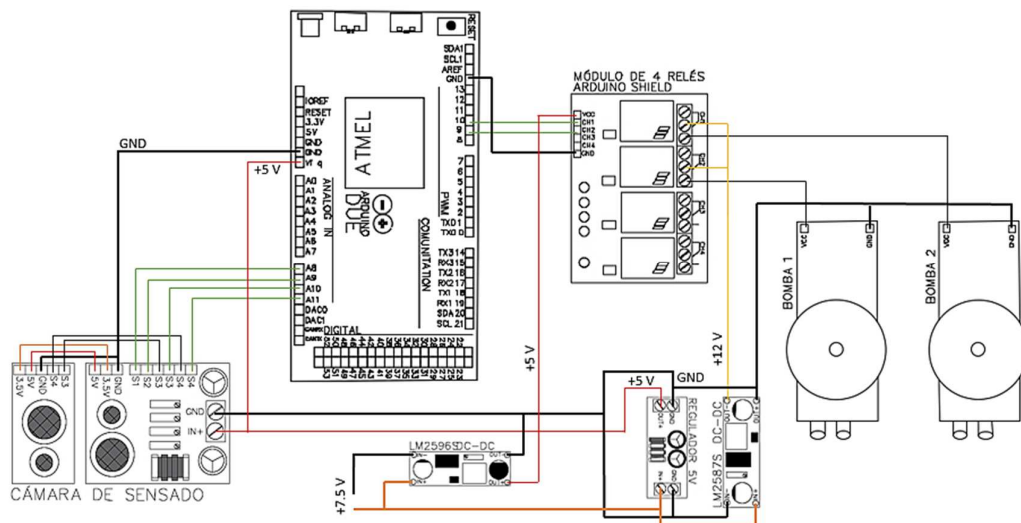


Figura 52. Diagrama eléctrico de conexiones al Arduino Due

La FaceCam-321 (ver Figura 51a), posee 8 Megapíxeles con una resolución de 640x480 píxeles y necesita una alimentación de 5 [V], por lo que se conecta a la tarjeta Raspberry Pi por cable USB.

La ubicación de los elementos de la etapa de potencia y control sobre el robot se pueden apreciar en la Figura 53.

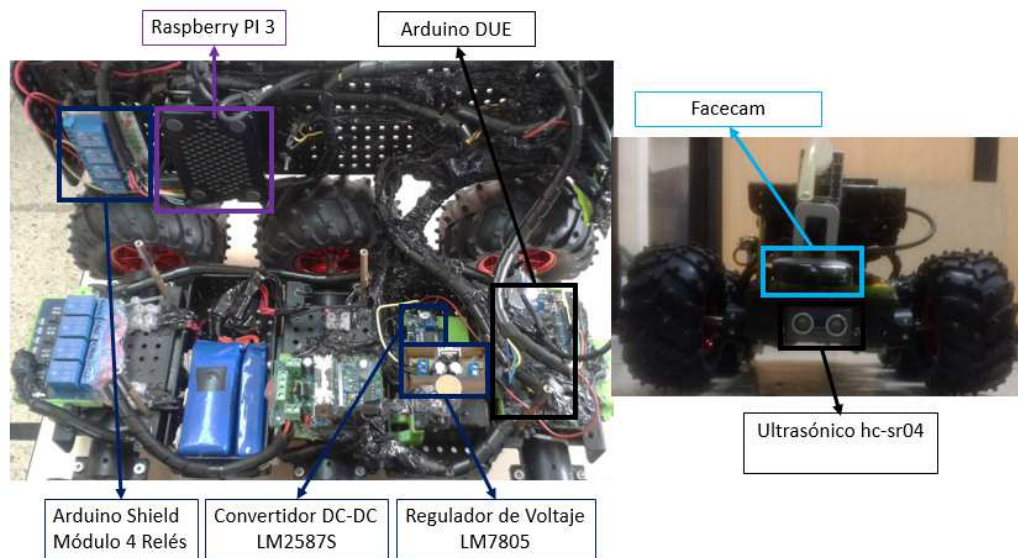


Figura 53. Ubicación de los elementos de la etapa de potencia y control

5.1.2. Acondicionamiento de los bloques de la nariz electrónica

La alimentación de los sensores químicos TGS 2610 y TGS 822 de la cámara de sensores y de la Raspberry PI (bloque de adquisición) es de 5 [V], dicha alimentación se tomó de la salida del regulador de voltaje LM7805 para así asegurar su correcto funcionamiento.

Las 2 bombas del bloque neumático se activan y desactivan a través del módulo de 4 relés que están polarizados con 12 [V]. La ubicación de los elementos de los bloques de medición y neumático de la nariz electrónica se pueden apreciar en la Figura 54.

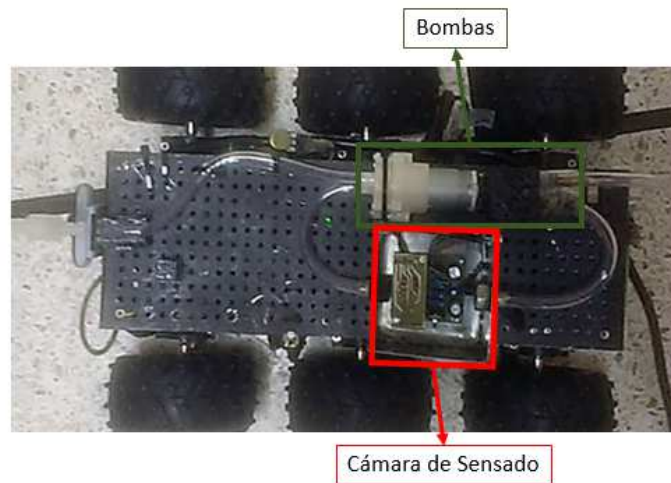


Figura 54. Ubicación de los elementos del bloque de medición y neumático

5.2. Comunicación con la nariz electrónica

Para embeber el modelo de discriminación, mostrar los datos resultantes de la experimentación, visualizar a través de la webcam el ambiente de trabajo y gestionar la base de datos se utilizó la comunicación inalámbrica Wireless (WLAN 802.11) que tiene la Raspberry PI, para lo cual se necesitó un conmutador inalámbrico en este caso se usó un Router TP-LINK.

La red usada para la comunicación inalámbrica es la 192.168.1.0/24, donde el Router TP-LINK posee la dirección 192.168.1.1 y la tarjeta Raspberry PI con la dirección 192.168.1.2 como se muestra en Figura 55. Se recalca que la comunicación únicamente se la realiza para visualizar resultados, modificar parámetros de funcionamiento de la nariz electrónica, ya que todo el procesamiento de las señales y la ejecución del modelo de discriminación se lo realiza de manera embebida.

Para modificar los parámetros de funcionamiento de la nariz electrónica se hace uso de una herramienta de manejo remoto a través del protocolo RDP (Remote Desktop Protocol) que se indica en la Figura 56, al mismo tiempo se puede reprogramar el funcionamiento de la tarjeta Arduino Due.

Adicional se usó los protocolos de comunicación SSH, FTP, HTTP de la capa de aplicación para permitir un manejo más sencillo y eficaz de Raspberry PI cuyas credenciales de uso responden a Usuario: pi, y Contraseña: tesis2017.

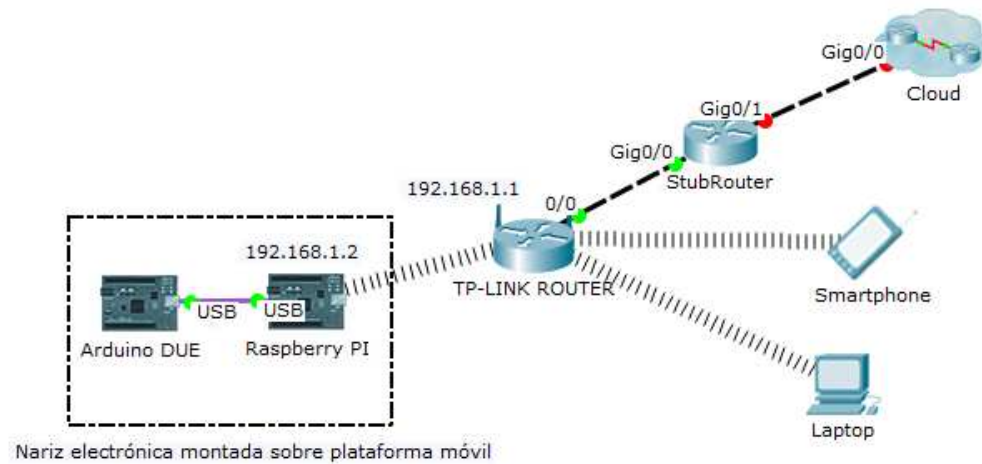


Figura 55. Diagrama de red usado para la comunicación de la nariz electrónica



Figura 56. RDP de Microsoft a través de sistema operativo Windows

5.3. Navegación del sistema robótico

Sabiendo que uno de los objetivos estratégicos del Ejército Ecuatoriano es: “Optimizar las operaciones militares en la defensa de la Soberanía y Seguridad Integral” (Ejército Ecuatoriano, 2017), el desafío más importante es la lucha contra el empleo, comercialización, fabricación y tenencia de explosivos, con más precisión, de artefactos explosivos, amenazando la seguridad de las tropas durante el desarrollo de las operaciones militares y en cuanto a la población civil generar amenazas con fines

terroristas, considerando que entre más mínimo sea el acercamiento y el tiempo reduce el riesgo de posibilidad de muerte de una persona.

La seguridad constituye un reto de vital importancia en virtud a los acontecimientos y cambios sociales que se manifiestan hoy en día. El desarrollo de tecnología en base a la innovación es su principal herramienta: la tecnología proporciona información acerca de las amenazas, ayuda a crear la cobertura más conveniente contra ellas y, si es apropiada, facilita su neutralización. (Ministerio de Defensa, 2009)

La detección de trazas es una de estas tecnologías, sirve para la detección de la carga explosiva, es decir analizan los rastros que dejan los explosivos en forma de partículas o vapor. Para su funcionamiento requieren la adquisición física de pequeñas muestras de material seguida de su separación y análisis. Entre estas tecnologías se encuentra el olfato de los animales, así como las narices electrónicas. (Ministerio de Defensa, 2009)

Mediante el uso de robot móviles integrados con narices electrónicas permiten la navegación de forma autónoma o asistida hasta la localización de las sustancias explosivas para detectar de que tipo son. En caso de que la sustancia explosiva sea parte de una carga u objeto sospecho permite obtener la mayor información posible sobre la composición, estructura, diseño y mecanismo de armado del artefacto explosivo para la posterior neutralización o desactivación.

5.3.1. Descripción del ambiente controlado

Si bien es cierto, en Ecuador los actos terroristas no forman parte de las principales amenazas a la seguridad, sin embargo, las amenazas telefónicas de bombas o la presencia de paquetes sospechosos en instituciones como universidades, aeropuertos o estadios no se descartan.

Los escenarios que se pueden considerar son: puntos de control, entornos abiertos y en operaciones de búsqueda. Se denomina punto de control aquel lugar donde es posible establecer controles o inspecciones, por ejemplo, el sector aeronáutico. Los entornos abiertos son escenarios muy complejos donde se dificulta detectar la presencia de explosivos, ya que se requiere una altísima sensibilidad y una adecuada especificidad para evitar falsos resultados (por ejemplo, una estación de tren).

Finalmente, las operaciones de búsqueda cuyo objetivo es localizar la posible presencia de un artefacto explosivo en un área delimitada, y/o verificar su no existencia. (Ministerio de Defensa, 2009)

Por lo tanto, se adecuo un ambiente controlado que emula los escenarios que se mencionaron en el párrafo anterior. El lugar de experimentación fue en un laboratorio de dimensiones 4,20x2,4x2,2 [m] dando un área de trabajo de 10,08 [m²] y un volumen de 22,176 [m³], dicho laboratorio presenta fugas de aire debido a ventanas existentes en la parte superior del mismo como se muestra en la Figura 57.



Figura 57. Área de experimentación (ambiente controlado)

A partir de la detección de los objetos sospechosos que se realizó en el trabajo de titulación de Arias (2017), se realiza la navegación y detección de las sustancias explosivas que estos poseen, por lo que se mantuvo el color rojo para simbolizar el objeto sospechoso con sustancia explosiva, dicho objeto debe poseer una altura mínima de 6 [cm] y un máximo de 10 [cm] (ver Figura 58). El vial con la sustancia explosiva (ver Figura 58) estará a una altura 6 [cm] del piso para que la nariz electrónica pueda realizar la medición y obtener los datos para su preprocesamiento para proyectarlos sobre el modelo de discriminación y así determinar qué tipo de sustancia es (TNT, Pólvora base doble y Alcohol).

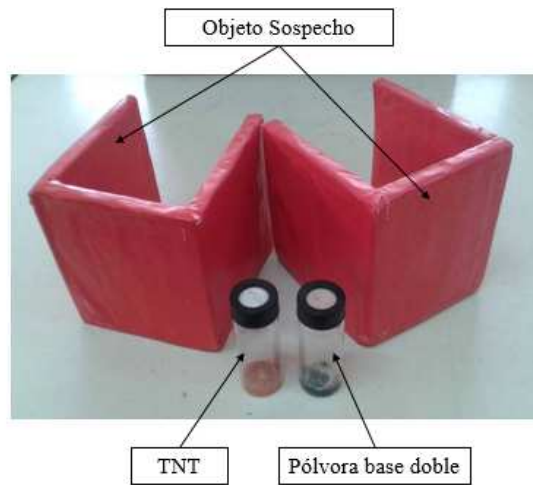


Figura 58. Objeto sospecho y viales con sustancias explosivas

5.3.2. Implementación de navegación asistida

Para que la plataforma móvil sea capaz de desplazarse hacia la sustancia de interés, ubicarse y reconocerla, se ha hecho uso de navegación asistida, es decir debe existir un operador que la maneje, sin embargo las técnicas de navegación asistida ocupan un control de navegación externo como por ejemplo un joystick, es decir no embebido, manteniendo estas directrices la nariz electrónica montada sobre la plataforma móvil no sería autónoma; por lo tanto para lograr autonomía se montará un servidor web y de streaming de la FaceCam en la Raspberry PI que permita el manejo de la plataforma móvil.

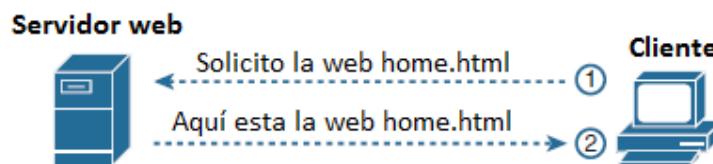


Figura 59. Lógica de uso de un servidor web

El funcionamiento de un servidor web se lo establece a través de la convención solicitud/respuesta, la Figura 59 indica el funcionamiento básico de un servidor web, en este el cliente hace una petición de información al servidor y este procede a enviar una respuesta, cuando finaliza se cierra la conexión y no se puede actualizar más la página web; dicha lógica de funcionamiento no es útil para implementar la navegación

asistida a través de un servidor web, debido a que es necesario actualizar información de los controles de navegación y también conocer la respuesta de los experimentos, para solucionar este inconveniente se hace uso de la tecnología Websockets que teniendo como principio el funcionamiento de los sockets de ofrecer una canal de comunicación dedicada en páginas web que permite constantes actualizaciones como indica la Figura 60 (Khakhariya, 2016).

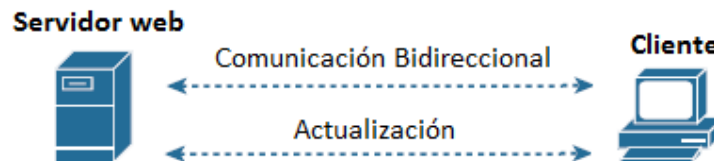


Figura 60. Lógica de servidor web con websockets

La Figura 61 indica que el puerto lógico usado por Raspberry Pi para funcionar como servidor web es el 8080, debido a eso para acceder a la navegación asistida es necesario ingresar en el navegador web del operador la dirección IP 192.168.1.2:8080, desde allí se puede dirigir la navegación del robot, iniciar experimentos y verificar resultados de la discriminación de sustancias.

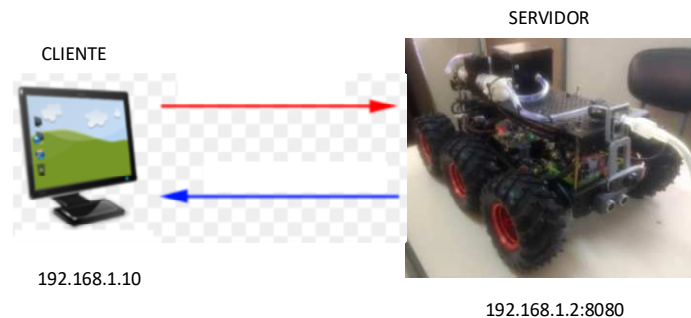


Figura 61. Conexión del operador con la nariz electrónica

La implementación del servidor web se la realizó también en Python, para el uso de Websockets se hace uso del servidor web Tornado que es una librería para el manejo de redes de forma asíncrona. La Figura 62 indica el diagrama de flujo del funcionamiento de la nariz electrónica cuando un operador inicia su uso; la Raspberry Pi procede a importar a ejecución los modelos PCA, LDA y el clasificador Knn obtenidos en el procesamiento de la señal y que serán de uso para clasificar el actual experimento.

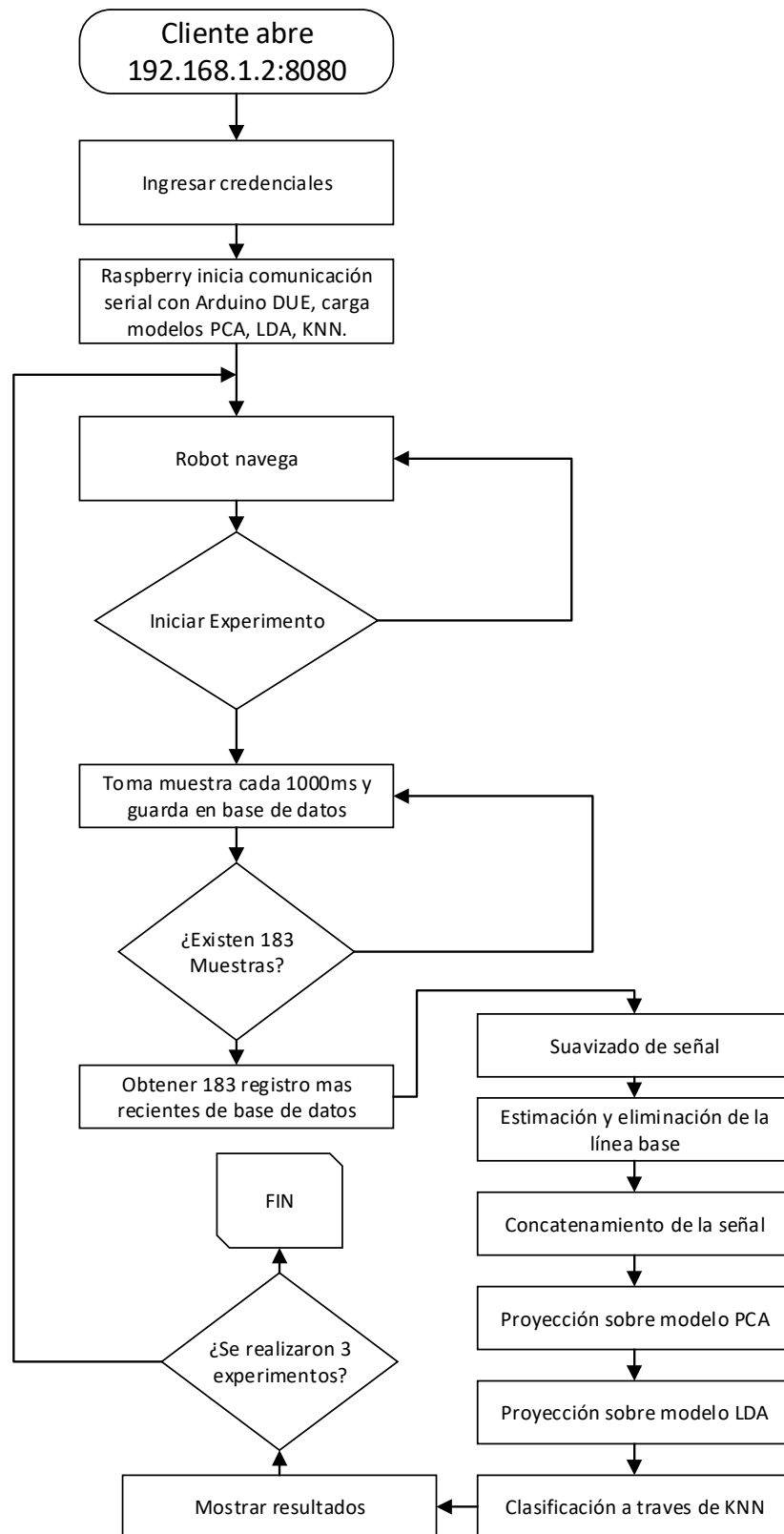


Figura 62. Diagrama de flujo de funcionamiento del servidor web

Adicional, en la Figura 63 se muestra la interfaz gráfica, en esta el operador deberá ingresar sus credenciales de funcionamiento y dar clic en el botón “Iniciar”.



Figura 63. Interfaz gráfica inicial

A continuación, se muestra la interfaz de la Figura 64, en esta el usuario dispone de tres secciones:

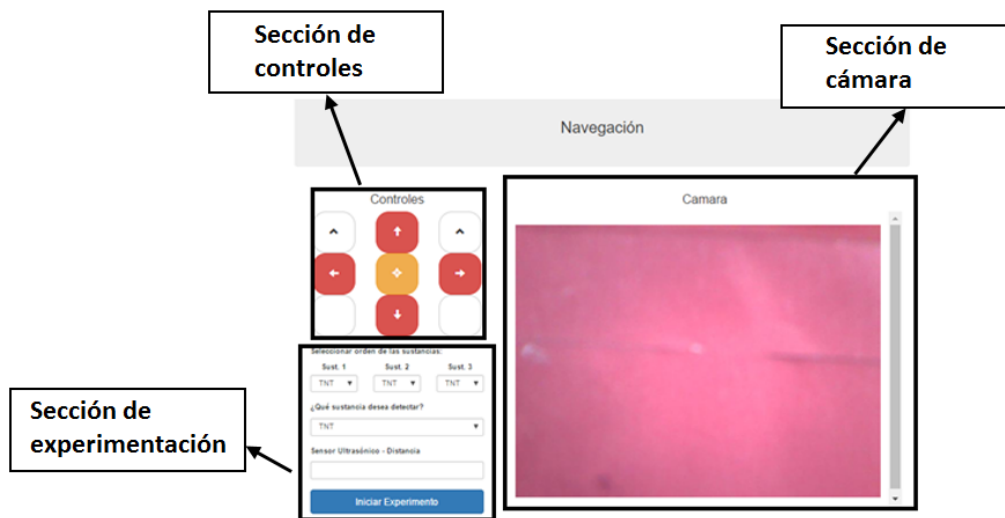


Figura 64. Interfaz de navegación del robot

- Cámara: Sección en la que se puede visualizar la FaceCam ubicada en la parte delantera del robot para poder brindar retroalimentación al operador para que se acerque de manera correcta a la sustancia (ver Figura 64).
- Controles: Sección dedicada para la navegación del robot y su ubicación frente a la sustancia de interés, en la Figura 65 se puede visualizar los distintos controles de navegación para las siguientes direcciones:

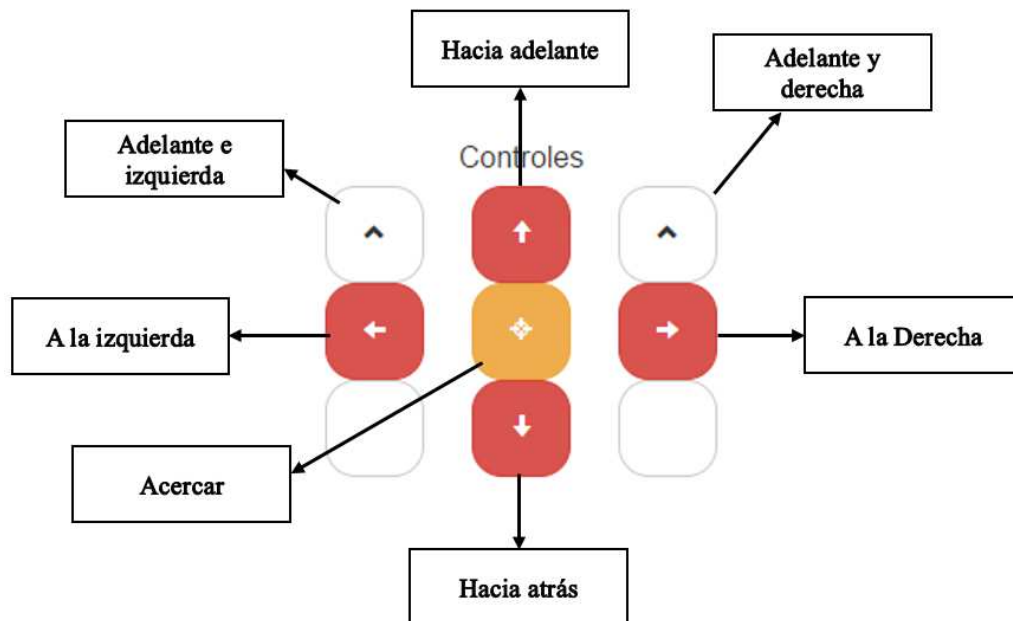


Figura 65. Controles de navegación asistida

- Hacia adelante: Permite que la plataforma móvil se desplace hacia adelante
- Hacia atrás: Permite que la plataforma móvil se desplace hacia atrás
- Hacia los lados: Permite que la plataforma móvil se desplace hacia el lado seleccionado
- Acercar: Permite que la plataforma móvil una distancia pequeña hacia adelante para ubicarse frente a la sustancia
- Hacia adelante y derecha: Permite que la plataforma móvil se dirija hacia adelante y gire a la derecha.

- Hacia adelante e izquierda: Permite que la plataforma móvil se dirija hacia adelante y gire a la izquierda.
- Experimentación: Esta sección posee de cuatro componentes como se indica en la Figura 66:

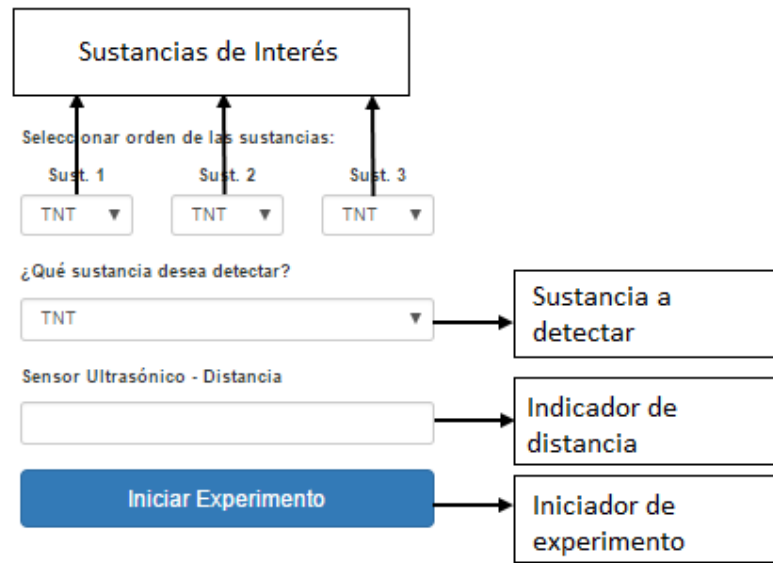


Figura 66. Sección de experimentación

- Sustancias de interés: Se colocan tres sustancias de interés, permite que los operadores indiquen que sustancia se olerá para validar al tener los resultados.
- Sustancia a detectar: Este campo permite que el operador seleccione la sustancia que desea detectar.
- Indicador de distancia: Este campo indica la distancia detectada por el sensor ultrasónico ubicado delante de la plataforma móvil.
- Iniciador de experimento: Mediante este botón se da inicio a un experimento.

Cuando el operador ha ubicado la plataforma móvil frente a la sustancia sospechosa y haya presionado sobre “Iniciar Experimento” se procede a tomar las muestras de los sensores de la nariz electrónica durante 183 [s], dichos valores se almacenan en la base datos, al culminar la recolección de dichos valores, se realiza el preprocesamiento y su

clasificación a través del modelo previamente cargado, cabe recalcar que la comunicación de Raspberry a Arduino Due es serial, todo el proceso de experimentación se lo repetirá tres ocasiones.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se realizó la etapa de pruebas con el fin de verificar el funcionamiento de la integración de la nariz electrónica con la plataforma móvil. El comportamiento y efectividad del preprocesamiento de las señales, modelo de discriminación y el algoritmo de navegación embebidos en el robot.

Se realizaron un total de 30 pruebas desde el 05/06/017 hasta el 19/06/017 en una franja horaria comprendida desde las 07:00am hasta las 16:30pm. En cada prueba se posiciono al robot a una distancia de 50 [cm] de los objetos sospechosos como se muestra en la Figura 67.

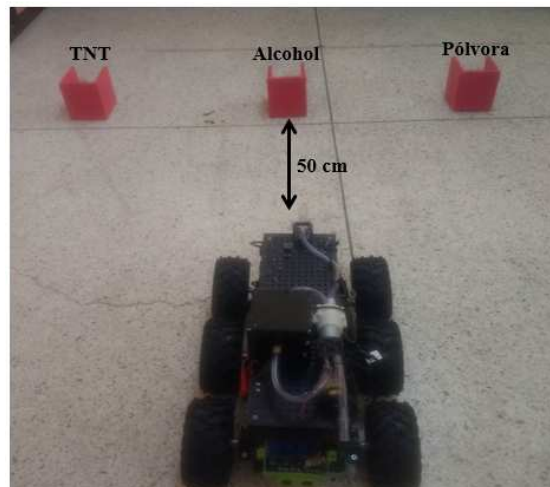


Figura 67. Posición inicial del robot móvil

Se estableció 10 combinaciones con las tres sustancias de interés, dos sustancias explosivas (TNT y Pólvora base doble) y una sustancia no explosiva (Alcohol), el orden de asignación de las sustancias a los objetos sospechosos se hizo en forma aleatoria para evitar el efecto memoria al momento de la experimentación. Para la sustancia a detectar se estableció en orden alfabético alternándose cada 3 combinaciones como se puede visualizar en la Tabla 23.

Tabla 23
Planificación de las pruebas de funcionamiento

Fecha/Día	Ord	Hora	Sustancia Establecida			Sustancia a Detectar
			Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	
Lunes 05/06/2017	1	07:30	Pólvora	TNT	Alcohol	Alcohol
	2	10:30	TNT	Alcohol	Pólvora	Pólvora
	3	13:30	Alcohol	Pólvora	TNT	TNT
Martes 06/06/2017	4	08:00	Alcohol	Alcohol	Alcohol	Alcohol
	5	10:00	TNT	TNT	Pólvora	Pólvora
	6	14:30	Alcohol	Pólvora	Alcohol	TNT
Miércoles 07/06/2017	7	07:30	Alcohol	Alcohol	TNT	Alcohol
	8	09:30	Pólvora	TNT	Pólvora	Pólvora
	9	13:30	TNT	Alcohol	TNT	TNT
Jueves 08/06/2017	10	09:00	Pólvora	Pólvora	Alcohol	Alcohol
	11	11:00	Pólvora	TNT	Alcohol	Pólvora
	12	14:00	TNT	Alcohol	Pólvora	TNT
Viernes 09/06/2017	13	07:00	Alcohol	Pólvora	TNT	Alcohol
	14	10:00	Alcohol	Alcohol	Alcohol	Pólvora
	15	14:00	TNT	TNT	Pólvora	TNT
Lunes 12/06/2017	16	07:45	Alcohol	Pólvora	Alcohol	Alcohol
	17	10:45	Alcohol	Alcohol	TNT	Pólvora
	18	13:30	Pólvora	TNT	Pólvora	TNT
Martes 13/06/2017	19	08:00	TNT	Alcohol	TNT	Alcohol
	20	10:30	Pólvora	Pólvora	Alcohol	Pólvora
	21	14:30	Pólvora	TNT	Alcohol	TNT
Miércoles 14/06/2017	22	07:30	TNT	Alcohol	Pólvora	Alcohol
	23	10:30	Alcohol	Pólvora	TNT	Pólvora
	24	13:30	Alcohol	Alcohol	Alcohol	TNT
Jueves 15/06/2017	25	07:00	TNT	TNT	Pólvora	Alcohol
	26	09:30	Alcohol	Pólvora	Alcohol	Pólvora
	27	12:30	Alcohol	Alcohol	TNT	TNT
Viernes 16/06/2017	28	08:30	Pólvora	TNT	Pólvora	Alcohol
	29	11:30	TNT	Alcohol	TNT	Pólvora
	30	14:00	Pólvora	Pólvora	Alcohol	TNT

Para realizar las pruebas de funcionamiento el operador inicia la aplicación web ingresando la dirección 192.168.1.2:8080 en el navegador, en la pantalla inicial se ingresa el usuario y contraseña y se da clic en el botón “Iniciar”, como se muestra en Figura 68.

Figura 68. Pantalla inicial de la aplicación web e-Nose

En la pantalla siguiente se selecciona el orden de las tres sustancias a ser analizadas (ver Figura 69) y también de la sustancia que se desea detectar. El operador realiza un reconocimiento del área para visualizar la posición de los mismos mediante la FaceCam como se muestra en la Figura 69.

Figura 69. Pantalla de navegación de la aplicación web e-Nose

Se inicia la navegación mediante las teclas de control hacia el primer objeto sospechoso (ver Figura 70a), el robot se posiciona frente al objeto hasta que el indicador de la distancia este a 10 [cm] aproximadamente (ver Figura 70b) y la pantalla de la FaceCam está completamente de color rojo, al llegar a dicha posición se da clic al botón “Iniciar Experimento” para activar la nariz electrónica (ver Figura 70c).

a) Navegación hacia el 1er objeto



b) Posicionamiento del robot en el 1er objeto



c) Pantalla de navegación antes de experimentación



Figura 70. Navegación del robot hacia objeto sospechoso

Al completarse el 100% la barra del proceso aparece una pantalla emergente que muestra el resultado de la sustancia que se detectó como se observa en la Figura 71.

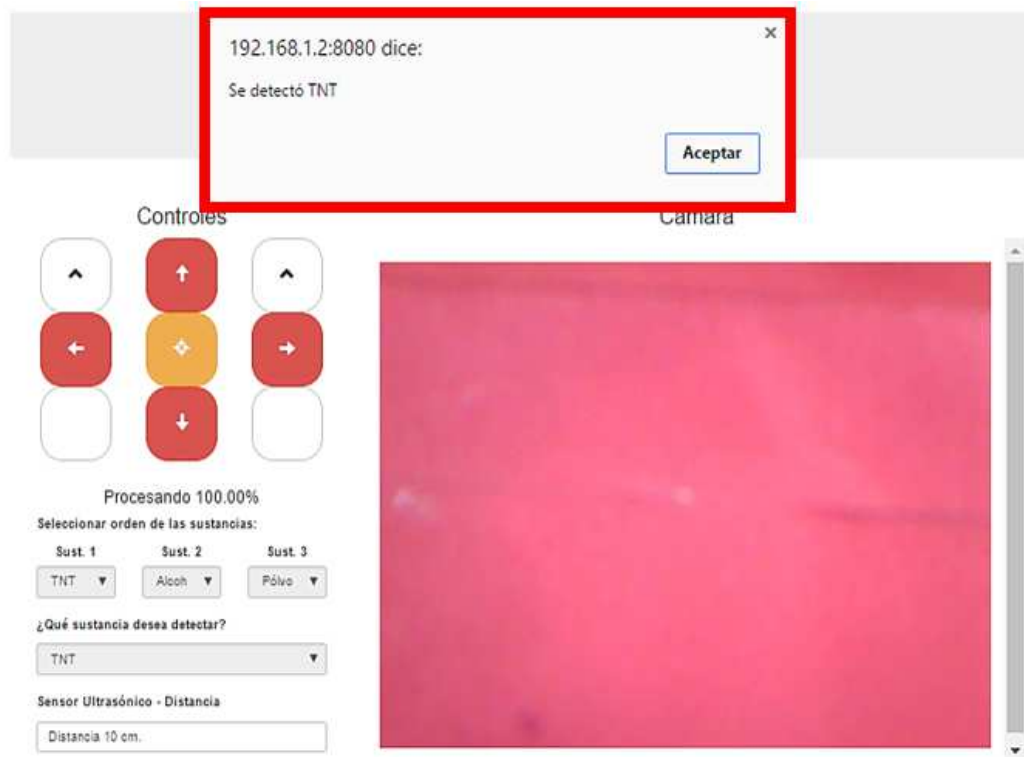


Figura 71. Pantalla emergente con resultado del experimento

El operador regresa al robot a su posición inicial y realiza el mismo procedimiento para los 2 objetos sospechosos restantes. Al terminar la prueba se muestra una ventana emergente que indica cuantos y cuáles son los objetos sospechosos que poseen la sustancia establecida. Además, se muestra una tabla con el orden de experimentación, la sustancia establecida y el resultado de la sustancia detectada, como se observa en la Figura 72.

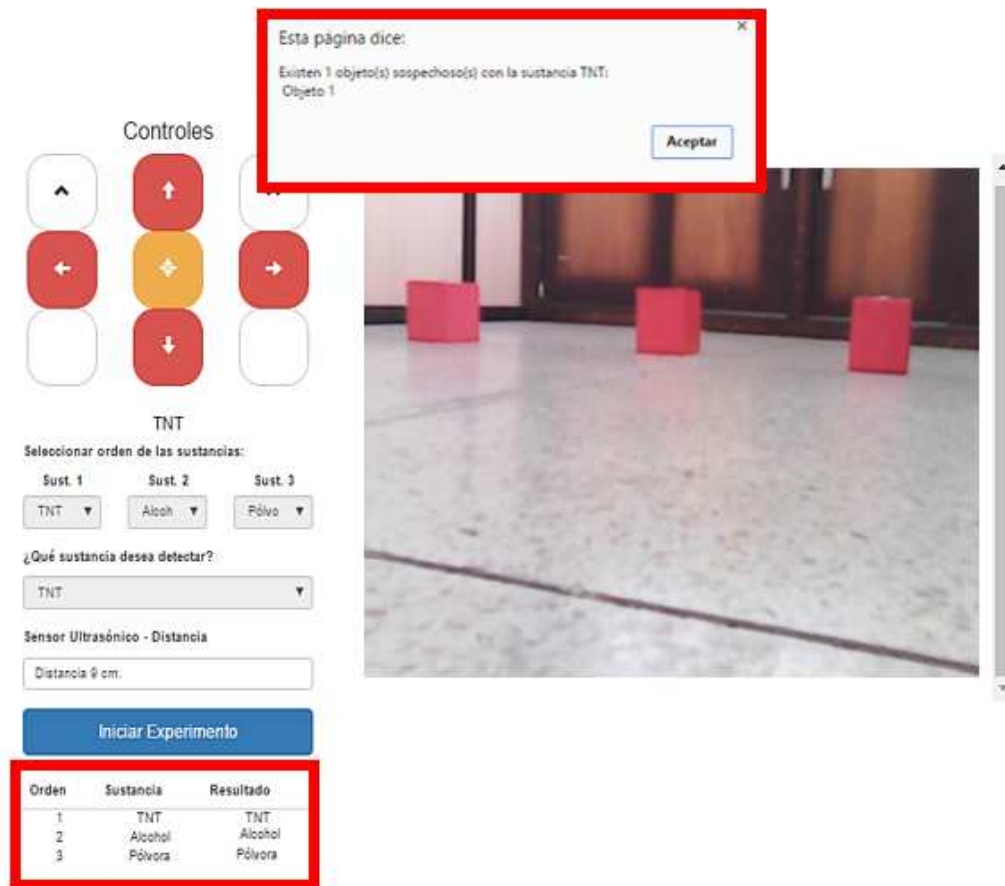


Figura 72. Pantalla de navegación con cuadro de resultados

Este procedimiento se realizó a las 30 combinaciones que se establecieron en la Tabla 23. Cada prueba tuvo una duración promedio de 12 min, por lo que la batería da cabida a realizar 9 pruebas; cabe mencionar que el posicionamiento del robot móvil sobre la sustancia explosiva se realiza con pocos movimientos por encontrarse cerca de la misma y dependerá de la habilidad del operador.

6.1. Resultados de las pruebas de funcionamiento

En la Tabla 24 se presentan los resultados de las 30 pruebas de funcionamiento, que equivalen a 90 experimentos, los mismos que se realizaron para verificar el desempeño del modelo de discriminación en base a dos sustancias explosivas (TNT y Pólvora base doble) y una sustancia no explosiva (Alcohol).

Tabla 24
Resultado de las pruebas de funcionamiento

Ord	Sustancia Predicha			Sustancia a Detectar	Objetos Sospechosos Identificados			
	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3		Cant.	Obj.1	Obj. 2	Obj. 3
1	Pólvora	TNT	Alcohol	Alcohol	1			X
2	TNT	Alcohol	Alcohol	Pólvora	0	Ningún objeto detectado		
3	Alcohol	TNT	TNT	TNT	2		X	X
4	Alcohol	Alcohol	Alcohol	Alcohol	3	X	X	X
5	Pólvora	TNT	Pólvora	Pólvora	2	X		X
6	Alcohol	Pólvora	Alcohol	TNT	0	Ningún objeto detectado		
7	TNT	TNT	TNT	Alcohol	0	Ningún objeto detectado		
8	Pólvora	Alcohol	TNT	Pólvora	1	X		
9	Pólvora	Alcohol	TNT	TNT	1			X
10	TNT	TNT	Alcohol	Alcohol	1			X
11	Pólvora	TNT	Pólvora	Pólvora	2	X		X
12	Alcohol	Alcohol	TNT	TNT	1			X
13	Alcohol	Pólvora	Pólvora	Alcohol	1	X		
14	Alcohol	Alcohol	TNT	Pólvora	0	Ningún objeto detectado		
15	TNT	TNT	TNT	TNT	3	X	X	X
16	Alcohol	TNT	TNT	Alcohol	1	X		
17	Alcohol	Alcohol	TNT	Pólvora	0			
18	TNT	TNT	Pólvora	TNT	2	X	X	
19	TNT	TNT	TNT	Alcohol	0	Ningún objeto detectado		
20	TNT	Pólvora	TNT	Pólvora	1		X	
21	Alcohol	TNT	Alcohol	TNT	1		X	
22	TNT	Pólvora	TNT	Alcohol	0			
23	Alcohol	Pólvora	Alcohol	Pólvora	1		X	
24	Alcohol	Alcohol	Alcohol	TNT	0	Ningún objeto detectado		
25	Pólvora	Pólvora	Pólvora	Alcohol	0	Ningún objeto detectado		
26	Alcohol	Pólvora	Pólvora	Pólvora	2		X	X
27	TNT	Pólvora	Pólvora	TNT	1	X		
28	TNT	TNT	Pólvora	Alcohol	0	Ningún objeto detectado		
29	Pólvora	Alcohol	Pólvora	Pólvora	2	X		X
30	Alcohol	Pólvora	TNT	TNT	1			X

Para determinar el porcentaje de éxito al clasificar que sustancia posee el objeto sospechoso analizado, se comparó entre la sustancia establecida con la predicha de cada experimento realizado.

De un total de 90 experimentos realizados, 53 de ellos dieron un resultado correcto al determinar que sustancia de interés es, mientras que 37 experimentos dieron un resultado incorrecto, por lo que se generó una matriz de confusión como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25
Matriz de confusión sobre la clasificación de sustancias de interés establecidas

MATRIZ DE CONFUSIÓN		PREDICHA		
		Alcohol	Pólvora B. D	TNT
REAL	Alcohol	24	4	8
	Pólvora B. D	3	13	11
	TNT	3	8	16

El modelo de discriminación tuvo 24 correctos y 12 incorrectos de un total de 36 experimentos para el Alcohol; la Pólvora de base doble un total de 13 correctos y 14 incorrectos, y finalmente para el TNT reflejo 16 correctos y 11 incorrectos de un total de 27 experimentos para cada sustancia explosivas. Por lo tanto, para determinar el porcentaje de efectividad se debe sumar la diagonal de coincidencia entre sustancias, es decir los que el modelo clasificó correctamente descartando los que erraron en la discriminación, de acuerdo a la Ecuación (20).

$$\% \text{ precisión} = \frac{\# \text{ aciertos}}{\# \text{ total de experimentos}} * 100 \quad (20)$$

$$\% \text{ precisión} = \frac{53}{90} * 100 = 58,88\% \quad (21)$$

Siendo el porcentaje de precisión de 58,88%, este valor es superior al porcentaje de aleatoriedad que para tres sustancias es del 33,33%, por lo que se puede determinar que no existe un patrón al momento de clasificar que sustancia poseen los objetos sospechosos.

En la Tabla 25 se observa que el modelo de discriminación al clasificar no confunde las sustancias explosivas con el Alcohol ya que únicamente dio seis errores, pero al discriminar entre sustancias explosivas existe confusión; de los 14 desaciertos que posee la Pólvora base doble el modelo clasificó 11 como TNT y de igual manera al

clasificar el TNT el modelo tuvo 11 desaciertos de los cuales ocho son Pólvora base doble. Por lo que si el modelo de discriminación se establece para determinar entre sustancia explosiva y no explosiva se generó la matriz de confusión que se muestra en la Tabla 26 para determinar su efectividad.

Tabla 26
Matriz de confusión sobre la clasificación en sustancias explosivas y no explosivas

MATRIZ DE CONFUSIÓN		PREDICHA	
		Sustancia no Explosiva	Sustancia Explosiva
REAL	Sustancia no Explosiva	24	12
	Sustancia Explosiva	6	48

Por lo tanto, el porcentaje de efectividad responde a la Ecuación (22).

$$\% \text{ precisión} = \frac{72}{90} * 100 = 80\% \quad (22)$$

De los valores obtenidos en la Ecuación (21) y Ecuación (22) se puede concluir que el porcentaje de efectividad de discriminación del modelo PCA+LDA con un clasificador de vecinos más cercanos de orden 12 es del 58,88%, es decir que seis de cada diez clasificaciones son correctas y en cuanto a sustancias explosivas es capaz de discriminarlas de las no explosivas en un 80%.

En cuanto al resultado con la sustancia a detectar, de un total de 30 pruebas establecidas, 13 dieron un resultado correcto al validar la sustancia a detectar mientras que 17 dieron un resultado incorrecto como se observa en la Tabla 27.

Tabla 27
Resultados de la sustancia a detectar

Sustancias Detectadas			
Sust	Cant	C	I
Alcohol	10	6	4
Pólvora B. D	10	2	8
TNT	10	5	5
Resultado	30	13	17
Dónde: C = Correctas; I = Incorrectas			

La Tabla 27 muestra que para el Alcohol se acertó seis de las 10 establecidas; la Pólvora de base doble tuvo únicamente un total de dos pruebas correctas y ocho incorrectas, y finalmente para el TNT reflejo cinco correctas e incorrectas, por lo tanto, el porcentaje de efectividad al validar la sustancia a detectar es del 43,33%.

En el trabajo previo realizado por López (2017) donde se implementó una nariz electrónica con la capacidad de detectar y discriminar sustancias explosivas en condiciones ideales y en un ambiente controlado, la nariz electrónica después de realizar 30 experimentos, logró detectar correctamente 21 de ellas, por lo que el porcentaje de efectividad es del 70%; y un 86,66% sobre las sustancias explosivas de las no explosivas, en un tiempo promedio de detección de cada experimento de 601,5 [s].

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, la integración de la nariz electrónica a un sistema robótico con el preprocesamiento de las señales, modelo de discriminación y la navegación embebida en la tarjeta Raspberry PI3, posee una eficiencia de 58,88% al discriminar las sustancias de interés; pese a la optimización de los bloques de la nariz electrónica esta es 11,12% menos efectiva. En cuanto a sustancias explosivas es capaz de discriminarlas de las no explosivas en un 80%, es decir 6,66% menor al trabajo previo.

Se debe considerar que se pretendió simular un ambiente controlado, pero existieron factores externos como corrientes de aire indeseadas al momento de la medición por encontrarse la muestra a una distancia de 5 [cm] a la nariz electrónica. Además, el ruido provocado por el encendido y apagado de los motores del robot y de las bombas de la nariz electrónica, y la variación de los parámetros de las muestras en los viales (disolución del alcohol) provocó que las señales varíen su respuesta y contenga un mayor ruido.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Se realizó el acondicionamiento y montaje de la nariz electrónica sobre la plataforma móvil “Dagu Wild Thumper 6WD” permitiendo la integración entre la medición con la movilidad siendo capaz el robot de localizar y navegar hacia objetos sospechosos e identificar que sustancia explosiva poseen con un 58,88% de éxito de clasificación y 43,33% de detección.
- Se optimizó los tres bloques de la nariz electrónica, reduciendo el volumen de la cámara de sensores a 384 [cm³] con cuatro sensores químicos en dos matrices de 1x2. Se eliminó las electroválvulas del sistema neumático para utilizar únicamente dos bombas y se estableció el uso de las tarjetas Arduino Due y Raspberry PI3 para la adquisición, procesamiento y navegación.
- Se embebió el preprocesamiento de las señales, el modelo de discriminación y la navegación en la tarjeta Raspberry PI3 en base al software Python 2.7 dando mayor autonomía al robot.
- Se desarrolló una aplicación web que permitió el manejo asistido del robot mediante la visión artificial (FaceCam) para localizar y navegar hacia los objetos sospechosos.
- Se desarrolló un modelo para la discriminación de TNT, pólvora en base doble y alcohol que consistió en la combinación del análisis de componentes principales (PCA) y análisis lineal discriminante (LDA) con un clasificador kNN de orden 12, dando una tasa de clasificación del 58,88% al discriminar entre las tres sustancias; y un 80% entre sustancias explosivas de las no explosivas.

7.2. Recomendaciones

- En vista que los sensores químicos Figaro TGS 822 y TGS 2610 no se encuentran en el mercado comercial nacional se debe prever su compra en el exterior con anterioridad para evitar posibles demoras por envío, proceso de aduanización y entrega.
- El aire del ambiente se debe considerar como otra sustancia al momento de elaborar el modelo de discriminación para así validar cuando no existe ninguna sustancia al momento de realizar la experimentación.
- Adecuar correctamente el lugar de trabajo y mantener las muestras de las sustancias en los parámetros establecidos a fin de mejorar las condiciones de experimentación para evitar errores al desarrollar el modelo de discriminación.
- Si se desea mejorar el modelo de discriminación se debe buscar otros algoritmos de machine learning que permitan una mayor eficiencia al clasificar las sustancias explosivas.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, D. (2013). *Ondas acústicas, método para detectar bombas a distancia*. USA.
- Ahmed Mohamad Farah, T. D. (2002). Reactive Localisation of and Odor Source by a Learning Mobile Robot. *Proceedings*, 29-38.
- Aleixandre, M., Lozano, J., Gutiérrez, J., Sayago, I., Fernández, M., & Horrillo, M. (2008). Portable e-nose to classify different kinds of wine. . *Sensors and Actuators B: Chemical.*, 71-76.
- Almeida, A. (1994). Neural Network in oven prevents overcooking. *The institute*, 3.
- Arias, B. (3 de Febrero de 2017). *Desarrollo e implementación de algoritmos de localización de fuentes de olor en un sistema robótico*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- Aromatherapy, S. (2004). *Aromatherapy and the Olfactory System*. Obtenido de <http://www.serene-aromatherapy.de/aromaolfactory.html>
- Arroyo, J. (04 de Junio de 2015). *Milenio*. Obtenido de http://www.milenio.com/firmas/universidad_politecnica_de_tulancingo/Sensores-electronicos-extensiones-sentidos-humano_18_530526987.html
- Bambino, I. (2008). Una Introducción a los Robots Móviles.
- Botre, B., Gharpure, D., & Shaligram, A. (2009). *Embedded Electronic Nose and Supporting Software Tool for its parameter optimization*.
- Boyle, B. (2006). Electronic nose that sniffs out trouble.
- Brudzewski, K., Osowski, S., & Pawlowski, W. (6 de Noviembre de 2011). *Metal oxide sensor arrays for detection of explosives at sub-parts-per million concentration levels by the differential electronic nose*. Polonia.
- Canhoto, O., Pinzari, F., Fanelli, C., & Magan, N. (2004). Application of electronic nose technology for the detection of fungal contamination in library paper. *International Biodeterioration & Biodegradation.*, 303 – 309.
- Capka, L., Vecera, Z., Mikuska, P., Sesták, J., & Kahlea, V. (16 de Febrero de 2015). A portable device for fast analysis of explosives in the environment. República Checa.
- CCFFAA. (23 de Agosto de 2016). *Departamento de Control de Armas*. Obtenido de <https://controlarmas.cffaa.mil.ec/mision/>
- Cetronic. (s.f.). *Cetronic Componentes Electrónicos*. Obtenido de <http://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idTienda=93&codProducto=888304018>
- Charumporn, B., & Omatu, S. (2002). *Classifying Smokes Using an Electronic Nose and Neural Networks*. IEEE.

- Colorado, C. (23 de Agosto de 2016). *Clasificación y Características de los explosivos*. Bogota, Colombia: ESING. Obtenido de https://www.academia.edu/24261468/CLASIFICACION_Y_CARACTERISTICAS_DE_LOS_EXPLOSIVOS
- Company, F., & Walter, G. (1968). *Electronics Nose: Principles and Applications*, 1-9. Oxford.
- Correa, E., Barreiro, P., & Ruiz-Altisent, M. (2002). *Nariz electrónica: ¿Herramienta para la calidad en la industria agroalimentaria?*
- DAGU. (2013). *DAGU educational robot 6WD wild thumper chassis*. Obtenido de <http://www.dagurobot.com/goods.php?id=47>
- Díaz, J. A. (2006). *Vulcanología: invento de una nariz electrónica capaz de oler gases*. Obtenido de <http://turcon.blogia.com/2006/030803-vulcanologia-inventode-una-nariz-electronica-capaz-de-oler-los-gases.php>.
- Diazaraque, J., & Marin, M. (08 de Abril de 2014). *Tema 3: Análisis de componentes principales*. Madrid, España. Obtenido de UC3M: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema3am.pdf>
- Duran, C. (2005). *Diseño y optimización de los subsistema de un sistema de olfato electrónico para aplicaciones agroalimentarias e industriales*. España.
- Ejercito Ecuatoriano. (2017). *Operaciones militares de Defensa Interna*. Obtenido de www.ejercitoecuadoriano.mil.ec
- El Barbri, N., Llobet, E., El Bari, N., Correig, X., & Bouchikhi, B. (2008). *Application of a portable electronic nose system to assess the freshness of Moroccan sardines.*, 666-670.
- FIGARO. (2007). *Electronic Technology Sensor*. Obtenido de <http://www.estcal.com/homeland.htm>.
- Fisher, M., & Cumming, C. (2001). *Proceedings of the 7th International Symposium on Analysis and Detection of Explosives*. Edinburgh, Escocia.
- Food Engineering. (1994). "Going the nose one better". USA.
- Gaffney, D. (12 de Diciembre de 2008). *Nariz electrónica olfatea problemas*.
- Gaibor, D., & Mediavilla, E. (1 de Abril de 2016). Desarrollo e implementación de un sistema robótico para el análisis de acetona en un ambiente controlado. Sangolqui, Pichincha, Ecuador.
- García, J. (2013). Los Aromas del Vino. *El olfato: Un sentido que debemos recuperar y ejercitar*. España.
- Gardner, J., Hines, E., & Wilkinson, M. (1990). Application of artificial Neural Networks to an Electronic Olfactory System. *Measurement Science and Technology*, vol 1.
- Genius. (2017). Facecam-321. Obtenido de <http://us.geniusnet.com/supports/facecam-321>
- González, A., Jiménez, J., & Baturone, O. (1996). *Informática y Automática: Estimación de la posición de un robot móvil*. España.

- Goschnick, J., Koroncz, I., Frietsch, M., & Kiseley, I. (2005). Sensors and Actuators. *Water pollution recognition with the electronic nose KAMINA*, 182–186.
- Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional de Colombia. (19 de Noviembre de 2014). *Con neutrones y rayos gamma, físicos logran ubicar minas antipersonas*. Obtenido de <http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/neutrones-y-rayos-gamma-para-detectar-minas-antipersonas/14851135>
- Gurrea, M. T. (01 de Agosto de 2016). *Componentes principales*. Obtenido de [www.uoc.edu](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf): http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de Experimentos*. México D.F: McGraw Hill.
- Gutierrez, J. (2011). *Diseño conceptual del sistema portante para un sensor GPR en un dispositivo para detección de minas antipersona en Antioquia-Colombia*. Medellín, Colombia: <http://www.bdigital.unal.edu.co/9268/1/11282711859.2011.pdf>.
- Hall, J. (2011). *Tratado de la fisiología médica*. España: Elsevier S.A.
- Hiroshi Ishida, A. K. (1999). Three-Dimensional Odor Compass. *IEEE*.
- Ishida, H., Wada, Y., & Matsukura, H. (2012). Chemical sensing in robotic applications. (págs. 3163–3173). *IEEE Sensors Journal*. Obtenido de <http://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2208740>
- Kay, K. (14 de Enero de 2012). *Random analyses in MATLAB*. Obtenido de Random analyses in MATLAB: <http://randomanalyses.blogspot.com/2012/01/principal-components-analysis.html>
- Khakhariya, M. (2016). International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology. *Internet of things: A survey on web based IoT application*.
- Kowadlo, G. (2008). The International Journal of Robotics Research. *Robot Odor Localization: A Taxonomy and Survey*.
- Larcombe, M. H. (1984). *Robotics in nuclear engineering: Computer assisted teleoperation in hazardous environments with particular reference to radiation fields*. Graham and Trotman for the COMission of the European Communities.
- Leardi, R. (2009). *Experimental design in chemistry: A tutorial*. Genoa, Italia.
- Leardi, R. (2013). Data Handling in Science and Techonoly Vol 28. En *Experimental Desing*. Genoa, Italia: Elseivier B.V.
- Lebrun, M., Plotto, A., Goodner, K., Ducamp, M.-N., & Baldwin, E. (2008). Postharvest biology and technology. *Discrimination of mango fruit maturity by volatiles using the electronic nose and gas chromatography.*, 122-131.
- Lilienthal, A. J., Loutfi, A., & Duckett, T. (2006). Airborne Chemical Sensing with Mobile Robots. 1616–1678. Obtenido de <http://doi.org/10.3390/s6111616>

- Linker, K. (2001). *Proceedings of the 3rd International Aviation Security Technology Symposium*. New Jersey, Atlanta, USA.
- López, I. (24 de Agosto de 2016). *Desarrollo de un prototipo electrónico de sensado químico, para la detección de trinitrotolueno (TNT) y pólvora base doble en un ambiente controlado*. Sangolqui, Pichincha, Ecuador.
- Lozano, J., Santos, J., & Aleixandre, M. (2003). *Sistema de nariz electrónica para el análisis de la evolución del vino controlada por PC*. Actas de Las XIV, 1–6.
- Martinez, J. (2012). *Anatomía y Fisiología. El aparato sensorial*.
- Mildner-Szkudlarz, S., & Jelén, H. (2008). ScienceDirect. Food Chemistry. *The potential of different techniques for volatile compounds analysis coupled with PCA for the detection of the adulteration of olive with hazelnut oil*, 751-761.
- Ministerio de Defensa Nacional. (08 de Febrero de 2017). Control de Armas. Quito, Ecuador. Obtenido de <http://www.defensa.gob.ec/control-de-armas/>
- Ministerio de Defensa, E. (Septiembre de 2009). *La seguridad frente a artefactos explosivos*. España: Imprenta del Ministerio de Defensa.
- Ministerio Nacional de Defensa. (2015). *Rendición de Cuentas 2015*. Quito.
- Montenegro, A., Trejos, M., & Araúz, C. (Diciembre de 2015). *Nariz Electrónica inalámbrica móvil con monitoreo en tiempo real*. Revista de Iniciación Científica.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. Mexico D.F: Limusa S.A.
- Moreno, I., Caballero, R., Galán, R., Matía, F., & Jiménez, A. (2009). Revista Iberoamericana de Autmática e Informática Industrial. *La nariz Elctrónica: Estado del Arte*, 76-91.
- Moriizumi, T., Nakamoto, T., & Sakuraba, Y. (1992). Sensors and Sensory Systems for an Electronic Nose. *Pattern Recognition in Electronic Noses*, 217-236.
- Nagle, H., Gutiérrez-Osuna, R., Kermani, B., & Schiffman, S. (2002). *Environmental Monitoring. To appear in Handbook Machine Olfaction: Electronic Nose Technology*, Wiley-VCH.
- NASA. (2012). *Mars Science Laboratory Curiosity Rover*. . Obtenido de <http://mars.nasa.gov/msl/mission/overview/>
- Osorio, P., Novoa, C., & Gutiérrez, L. (Septiembre de 2010). *Determinación de la viabilidad de la nariz electrónica en la predicción de la vida útil del queso doble crema*. Bogota, Colombia.
- Peña, D. (1 de Agosto de 2003). Análisis de datos multivariantes , 1 Ed. En D. Peña, *Análisis de datos multivariantes , 1 Ed* (págs. 133-170). Valencia: McGraw-Hill Interamericana de España. Obtenido de https://www.mhe.es/universidad/ciencias_matematicas/pena/home/CAPITULO.PDF

- Perea, A., Sundic, T., Pardo, A., Gutierrez-Osuna, R., & Marco, S. (Junio de 2002). *A Portable Electronic Nose Based on Embedded PC Technology and GNU/Linux: Hardware, Software and Applications*.
- Persaud, K., Jagers, H. C., Shaw, J. S., Peacock, S., Nicholas, P., Bartlett, P., . . . Boden. (1991). Odour detection using sensor arrays.
- Persaud, K., Pisanelli, A., Evans, P., & Travers, P. (2006). *Sensors and Actuators B: Chemical. Monitoring urinary tract infections and bacterial vaginosis*, 116-120.
- Pinheiro, C., Rodríguez, C., Schäfer, & Crespo, G. J. (2002). Monitoring the Aroma Production during Wine-Must. *Biotechnology and Bioengineering Fermentation with an Electronic Nose*, 632-640. .
- Pino, Y. (2009). *Determinación de técnicas de detección de explosivos óptimas para el departamento de antioquia*. Medellín, Colombia: http://www.bdigital.unal.edu.co/843/1/71376534_2009.pdf. Obtenido de www.sobreincendios.com
- Quicazán, M., Díaz, A., & Zuluaga, C. (16 de Junio de 2011). *La nariz electrónica, una novedosa herramienta para el control de procesos y calidad en la industria agroalimentaria*.
- Rarimez, J. (17 de Noviembre de 2014). *Acero Inoxidable*. Pamplona. Obtenido de <http://www.jacekleszczynski.com/images/5147/EI%20acero.pdf>
- Rodriguez, G. (2004). *El poderoso sentido del olfato*. California, USA: reSources.
- Rogers, G. (15 de Septiembre de 2016). *Matlab vs Python vs R*. Valparaiso, Chile.
- Rousier, R., Bouat, S., Bordy, T., Grateau, H., Darboux, M., Hue, J., . . . Laure, A. (9 de Diciembre de 2012). *T-REX: a portable device to detect and identify explosives vapors*. Francia.
- Rozas, R. M. (1991). Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Robotics. *Artificial Smell detection for robotic navigation*, 1730-1733.
- Ryan, M. (2001). *Sniffing Out Air Quality with an Electronic Nose*. USA.
- Sánchez Dams, R. D. (2009). *Entornos de Desarrollo Para Tecnologías Informáticas y Electrónicas, Vistas Desde el Microcontrolador.*, 33-38. Colombia.
- Schaller, E., Bosset, J., & Escher, F. (1998). *Electronic Noses and their application to food.*, 305-316.
- Sieglwart, R., & Nourbakhsh, I. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots. Robotica (Vol. 23)*.
- Staples, E. (2004). *Detecting Chemical Vapours from Explosives Using the zNose®, an Ultra-High Speed Gas Chromatograph*.
- Staples, E. J. (2007). *Analysis of Odors from Explosives using an Electronic Nose*. Obtenido de Electronic Sensor Technology: http://www.znose.jp/pdf/Odors_of_Explosives1.pdf

- Staples, J., & Landon, C. (2007). *Detection of Pulmonary Infections in Cystic Fibrosis Patients Using the zNose, an Ultra-fast Gas Chromatograph*. Obtenido de <http://www.estcal.com/TeachPapers/LifeScience/CysticFibro>
- Tikk, K., Haugen, J., Andersen, H., & Aaslung, M. (2008). *Monitoring of warmed-over flavour in pork using the electronic nose-correlation to sensory attributes and secondary lipid oxidation products.*, 1254-1263.
- Tom Duckett, M. A. (2001). *Learning to locate an odour source with a mobile robot*.
- Velasqu ez, D. (24 de Febrero de 2012). Ensayos de divulgaci n científica y human stica . *Sensores qu imicos. «Claves en los procesos de la comunicación»*.
- Vicente, C. T. (2005). *Generación Automática de Aplicaciones Mixtas Sw/Hw mediante la Integración de Componentes COTS*.
- Vicente, C. T. (2005). *Generación Automática de Aplicaciones Mixtas Sw/Hw mediante la Integración de Componentes COTS*.
- Villar Sebastian A., T. S. (2014). *El filtro de mediana como alternativa novedosa en el suavizado de señales acústicas de sonar de barrido lateral*. Argentina.
- Villarreal, L., Olague, G., & J.L., G. (2015). *Synthesis of Odor Tracking Algorithms with Genetic Programming Neurocomputing*.
- W. Zhao, R. C. (1998). *Discriminant Analysis of Principal Components for Face*.
- Zhang, H., Wang, J., & Sheng, Y. (2008). *Predictions of acidity, soluble solids and firmness of pear using electronic nose technique*, 370-378.
- Zhang, H., Wang, J., Sheng, Y., & Chang, M. (2008). *Evaluation of peach quality indices using an electronic nose by MLR, QPST and BP network.*, 332-338.
- Zuluaga, C., Díaz, A., & Martha, Q. (2 de Agosto de 2011). *Estandarizaci n y validación del método de análisis del perfil arom tico por nariz electrónica*.