

DESARROLLO DE UN SISTEMA MULTISENSORIAL EMBEBIDO PARA DETECCIÓN  
DE FALLAS INCIPIENTES EN TRANSFORMADORES ELECTRICOS



EMILI CATHERINE TRUJILLO BARAJAS  
Director. OSCAR EDUARDO GUALDRON GUERRERO  
Co-Director. DIEGO ALFONSO PELAEZ CARRILLO

Maestría en Controles Industriales  
Facultad de Ingenierías y Arquitectura  
Universidad de Pamplona  
2022

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante mi formación profesional. A mis padres **MARIA DE JESUS BARAJAS FUENTES** y **ELIECER TRUJILLO CUELLAR**, por ser el pilar más importante de mi vida, por demostrarme su cariño, apoyo incondicional, por velar siempre por mi bienestar y depositar su entera confianza en cada reto que se me presenta sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Y decirles que gracias ellos soy lo que soy ahora. A mi familia, principalmente a mis hermanos que siempre han sido mi ejemplo a seguir y me han ayudado en mi formación profesional.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es el resultado de la dedicación y esfuerzo conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo. Por esto agradezco a mi director, el doctor **OSCAR EDUARDO GUALDRON GUERRERO**, al ingeniero y amigo **DIEGO ALFONSO PELAEZ CARRILLO** por su compañía y apoyo en este proceso, por sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para mi formación como investigadora.

Como prioridad en mi vida agradezco a Dios por su infinita bondad, y por haber estado conmigo en los momentos que más lo necesitaba, por darme salud, fortaleza, responsabilidad y sabiduría, por haberme permitido culminar un peldaño más de mis metas, y porque tengo la certeza y el gozo de que siempre va a estar conmigo. A la Universidad de Pamplona, al programa de Ingeniería Electrónica, por haberme permitido desarrollarme como investigadora y poder desempeñarme dentro del campus universitario en mi profesión, a mis padres amigos, compañeros de estudio y demás personas que han aportado en mi vida personal y profesional siempre una palabra de aliento, consejo y un apoyo incondicional.

## TABLA DE CONTENIDO

### Contenido

RESUMEN.....	9
CAPITULO 1.....	10
1    INTRODUCCION .....	10
1.1    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	13
1.1.1    JUSTIFICACION.....	15
1.1.2    OBJETIVOS.....	18
1.1.2.1    OBJETIVOS ESPECÍFICO .....	18
CAPITULO 2.....	19
2    MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1    MARCO TEORICO .....	20
2.1.1    COMPONENTES BASICOS DE UN TRANSFORMADOR:.....	21
2.1.1.1    NUCLEO: .....	21
2.1.1.2    DEVANADOS:.....	22
2.1.2    NARIZ ELECTRÓNICA .....	22
2.1.3    SENSORES .....	25
2.1.4    REDES NEURONALES.....	26
2.1.5    DGA: .....	28
2.1.6    CROMATOGRFÍA DEL ACEITE DE LOS TRANSFORMADORES .....	28
2.1.7    HEADSPACE SAMPLING .....	32
2.2    ESTADO DEL ARTE.....	33
2.2.1    ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS .....	35
2.2.1.1    Acetileno.....	35
2.2.1.2    Etileno .....	36
2.2.1.3    Dióxido de Carbono.....	36
2.2.1.4    Hidrógeno.....	36
2.2.1.5    Compuestos del aire (O2, N2).....	36
CAPITULO 3.....	37
3.    NARIZ ELECTRONICA .....	38
3.1.    SENSORES .....	40
3.2.    CIRCUITO NEUMÁTICO.....	41

<b>3.3. CÁMARA DE SENSORES .....</b>	<b>44</b>
3.3.1. DISEÑO ELEMENTOS EN 3D.....	46
3.3.2. Arquitectura física E-nose 2.0 .....	47
<b>3.4. ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL .....</b>	<b>47</b>
<b>3.5. DAQ 6009.....</b>	<b>48</b>
<b>3.6. HEAD SPACE SAMPLING .....</b>	<b>49</b>
3.6.1. DISEÑO EN SOLIDWOR DE LA MAQUETA .....	50
3.6.2. FUNCIONAMIENTO DEL HEADSPACE SAMPLING.....	50
3.6.3. DISEÑO DE LA VAQUELA PARA EL CONTROLADOR DEL MOTOR PASO A PASO (NEMA 17).....	51
3.6.4. PANTALLA TFT320QVT:.....	51
3.6.5. EL SHIELD CTE TFT LCD/SD: .....	52
<b>3.7. DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIGITAL PID EN UN MICROCONTROLADOR ...</b>	<b>52</b>
3.7.1. TOMA DE DATA:.....	53
3.7.2. IDENT System Identification Toolbox: .....	55
3.7.3. Simulacion en Simulink: Con la planta de nuestro sistema obtenida.....	57
3.7.4. Curva de respuesta: .....	58
3.7.5. Cálculo de las Constantes del Controlador:.....	59
<b>3.8. DISEÑO ELECTRONICO DEL CONTROL DE POTENCIA .....</b>	<b>60</b>
3.8.1. OPTOTRIAC:.....	63
3.8.2. TRIAC:.....	64
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1. CONSTRUCCION .....</b>	<b>67</b>
<b>1. RESISTENCIA ELÉCTRICA: .....</b>	<b>68</b>
<b>2. TERMOCUPLA TIPO K:.....</b>	<b>68</b>
• EL EFECTO SEEBECK.....	68
• EL EFECTO PELTIER .....	69
• EL EFECTO THOMPSON.....	69
<b>3. ARDUINO.....</b>	<b>69</b>
<b>4. PROCESO DE TOMA Y ANÁLISIS DE LA MUESTRA.....</b>	<b>71</b>
HEADSPACE SAMPLING:.....	71
FUNCIONAMIENTO:.....	72
<b>5. NARIZ ELECTRONICA Y SU FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>73</b>

<b>FUNCIONAMIENTO</b> .....	74
<b>ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS</b> .....	74
<b>LA MUESTRA</b> .....	75
<b>SOFTWARE Y SU FUNCIONAMIENTO</b> .....	76
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	79
<b>5.1. RECOLECCION DE MUESTRAS</b> .....	80
<b>5.1.1. CALENTAMIENTO DE LA MUESTRA.</b> .....	80
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	84
<b>6.1. Análisis de Componentes Principales (Principal Component Analysis, PCA)</b> .....	85
<b>INTELIGENCIA ARTIFICIAL</b> .....	88
<b>RED NEURONAL</b> .....	88
<b>FUNCIÓN DE ENTRADA</b> .....	88
<b>FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN:</b> .....	89
<b>FUNCIÓN DE SALIDA</b> .....	89
<b>CONCLUSIONES</b> .....	91
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	92

## FIGURAS

Figura 1 funcionamiento de un transformador (“El Transformador El Transformador $P_i = P_s$ ,” n.d.) .....	20
Figura 2 Funcionamiento de las bobinas del transformador (“El Transformador El Transformador $P_i = P_s$ ,” n.d.).....	21
Figura 3 Núcleo de un transformador (brettis, 2013). .....	21
Figura 4 Devanados de un transformador .....	22
Figura 5 Analogía entre olfato humano y nariz electrónica. ....	23
Figura 6 Esquema General de la B-Nose (Eduardo et al., 2016).....	24
Figura 7 Arquitectura de una red neuronal. ....	27
Figura 8 Gas clave Acetileno ( $C_2H_2$ ). .....	29
Figura 9 Gas clave Hidrógeno ( $H_2$ ). .....	30
Figura 10 Gas clave Etileno ( $C_2H_4$ ). .....	31
Figura 11 Gas clave Monóxido de Carbono ( $CO$ ). .....	31
Figura 12 Proceso de inyección de la muestra y procesamiento de datos.....	32
Figura 13 Esquema de la E-nose (Eduardo et al., 2016) .....	39
Figura 14 Electroválvula 110V 1/4 de rosca .....	42
Figura 15 Diseño placa de electrónica de potencia con relés. ....	43
Figura 16 PCB control de circuito neumático .....	43
Figura 17 Sensor de Hidrogeno FIGARO .....	44
Figura 18 Circuito de sensor MOS.....	45
Figura 19 Diseño circuito de sensores .....	45
Figura 20 PCB de sensores .....	46
Figura 21 Diseño en SolidWorks de la cámara de sensores y cámara de concentración. ....	47
Figura 22 Arduino MEGA.....	47
Figura 23 DAQ 6009.....	49
Figura 24 Vista frontal STATIC HEADSPACE SAMPLING.....	50
Figura 25 Diseño del controlador del motor paso a paso.....	51
Figura 26 Pantalla LCD.....	52
Figura 27 El shield cte tft LCD/SD.....	52
Figura 28 Grafica exponencial del sensor termopar tipo K .....	54
Figura 29 TOLBOOX MATLAB IDENT .....	55
Figura 30 a) Model Output.....	56
Figura 31 Controlador PID en Simulink.....	57
Figura 32 Constantes del Controlador PID .....	57
Figura 33 Salida del Controlador.....	57
Figura 34 Respuesta de salida ante una entrada Escalón.....	58
Figura 35 Respuesta de salida ante una entrada escalón. ....	59
Figura 36 Esquema general del control de potencia.....	61
Figura 37 Cruce por cero de la señal de entrada .....	61
Figura 38 Onda seno.....	62
Figura 39 Señal luego del paso por el puente rectificador de onda completa .....	62
Figura 40 Disparo en los cruces por cero de la función.....	62
Figura 41 Parte 2 del sistema de control de potencia.....	63

figura 42 construcción del sistema de calentamiento.....	67
FIGURA 43 RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	68
figura 44 TERMOCUPLA TIPO K.....	69
Figura 45 PROCESO DE TOMA Y ANÁLISIS DE LA MUESTRA.....	71
Figura 46 Funcionamiento headspace sampling .....	72
Figura 47 Extracción de volátiles.....	73
Figura 48 E-nose V2.0 .....	74
Figura 49 Muestra del aceite.....	75
Figura 50 Vial de deposito.....	76
Figura 51 Interfaz de procesamiento y adquisición de datos.....	77
Figura 52 Interfaz de respuesta de la muestra.....	77
Figura 53 Muestra a temperatura ambiente. ....	81
Figura 54 Muestra a temperatura de 30°C .....	81
Figura 55 Muestra a temperatura de 40°C .....	82
Figura 56 Muestra a temperatura de 50°C .....	82
Figura 57 Muestra a temperatura de 60°C .....	83

## TABLAS

Tabla 1. Narices electrónicas comerciales y sus sensores.....	26
Tabla 2 Sensores de la e-nose .....	41
TABLA 3 DATA DEL SISTEMA .....	54
Tabla 4 REFERENCIAS DE TARJETAS ARDUINO .....	70

## RESUMEN

El funcionamiento principal de un transformador eléctrico desde el punto de vista de ingeniería, la cual es una de las máquinas de gran uso en cualquier parte del mundo, se comienza a analizar las posibles mejoras que se pueden implementar para así realizar su respectivo mantenimiento y mejoras en el monitoreo interno, llevando a cabo cada uno de estos análisis, nace la idea de poder implementar una nariz electrónica dentro de esta máquina para así obtener una data en tiempo real del funcionamiento y posibles daños a futuro del mismo, una vez que se conoce el método que se utiliza en cada una de las empresas encargadas de realizar mantenimiento y garantizar el respectivo funcionamiento dentro de sus parámetros normales, se propone como objetivo principal y general de este proyecto se desea implementar un dispositivo inteligente capaz de realizar el monitoreo y respectivo análisis desde el manejo y manipulación de una muestra de aceite por medio del cual se puede determinar solo con la extracción de los volátiles presentes dentro de este elemento, que es quien permite el debido funcionamiento del transformador.

El transformador es una máquina estática de bajas pérdidas y tiene un uso muy extendido en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución de energía eléctrica, dentro del funcionamiento principal es la de pasar de corriente alterna en corrientes de otras tensiones con el mismo valor o valores distintos, por medio de esta máquina se puede enviar flujo eléctrico a miles de hogares en el mundo y uno de los factores de los cuales depende el tiempo que disminuya de su vida útil de los transformadores, es el tipo de aceite mineral el cual lo conforme, ya que los transformadores están expuestos a agua y al sol las 24 horas del día esto ocasiona oxidación en el mismo, es ahí donde hace su trabajo el aceite dieléctrico como un lubricante que puede estar expuesto a altas temperaturas que tiene propiedades aislantes eléctricas. Desde la problemática que se planteó para el desarrollo del proyecto se tomó como base principal la elaboración de un sistema embebido capaz de detectar los gases volátiles incipientes en los transformadores eléctricos, para realizar la detección de cada uno de los gases que allí se localizan, se debe aplicar ingeniería de detalle para la toma y adquisición de datos provenientes del sistema multisensorial, esto por medio de cada una de las pruebas que se debe aplicar a los sensores que se utilizaron para la toma de muestras, luego de haber realizado este tipo de ingeniería, se debe realizar un algoritmo para clasificar los datos adquiridos por medio del sistema multisensorial anteriormente planteado y esto con el fin de saber qué tipo de gas se detectó para la respectiva clasificación de los mismos, una vez logrado cada uno de los pasos anteriormente formulados se debe realizar la validación del sistema con respecto a otros tipos de métodos que se utilizan actualmente para el análisis de dichos gases a evaluar, y con esto implementar sistemas de mantenimiento bien sean preventivos o predictivos y así evitarle costos a la empresa encargada de dar manteniendo y buen funcionamiento a estos elementos de distribución eléctrica.

# **CAPITULO 1**

## **1 INTRODUCCION**

El proyecto está basado en el análisis del aceite presente en los transformadores de potencia los cuales se encuentran localizados en las subestaciones y transformación de energía en media y alta tensión. Se aplican en subestaciones, centrales de generación y usuarios de gran potencia. Se construyen en potencias, voltajes y frecuencias estandarizadas según la región o país en donde va trabajar.

Para su funcionamiento, la vasta mayoría de los transformadores eléctricos emplean como fluido aislante aceites minerales y aislamiento sólido (papel), cuyo objetivo es ser un protector dieléctrico y transferentes de calor. Las propiedades de ambos medios pueden degradarse, tanto químicas (en el caso del papel aislante), así como en sus propiedades aislantes (en el caso del aceite). Todos estos componentes del aislamiento son los que deben ser diagnosticados y monitoreados apropiadamente, ya que son la base de los diferentes procedimientos de mantenimiento que acompañarán al transformador a lo largo de su ciclo de vida. En esa línea, se señala que los sistemas tradicionales predictivos en la medición periódica de las variables eléctricas, y la evaluación del aceite mediante análisis cromatográfico y fisicoquímico, DGA (departamento de gestión ambiental), junto a los análisis de foranos, azufre corrosivo, brindan información importante de la condición de salud operacional del transformador; pero advierte que no son un indicador de la totalidad de las fallas que se produce internamente en el equipo. Esto, debido a la gran cantidad de interpretación que se necesita para evaluar las distintas variables físicas y eléctricas que, a su vez, dependen de la metodología y experiencia que tenga cada laboratorio del medio para examinar e interpretar tanto las muestras de aceite como, en algunos casos, las pruebas eléctricas realizadas al equipo.

Los transformadores de potencia son partes vitales dentro del funcionamiento de una subestación eléctrica, de ahí la necesidad de minimizar las causas que pueden provocar su fallo o salida de servicio. Para evitar esto existen muchos equipos y métodos que se utilizan para tratar de monitorear su funcionamiento, sin embargo, la mayoría actúan hasta la presencia misma de la falla, lo que conlleva a la sustitución o reparación del equipo y por consiguiente la retirada total o parcial del servicio. De aquí que se lleve a cabo un mantenimiento predictivo y preventivo donde se realizan diversas pruebas al equipo eléctrico capaces de detectar posibles fallas antes de que estas se manifiesten de forma severa y provoquen reparaciones costosas. Una prueba que ha tenido un amplio reconocimiento a nivel mundial como método efectivo para la detección de fallas incipientes es el análisis de los gases disueltos en el aceite aislante.

Sin embargo, diferentes métodos y criterios en esta prueba presentan discrepancias en las metodologías propuestas y los resultados que brindan. Por tanto, se puede asegurar que el problema presenta un gran margen de incertidumbre y la experiencia juega un papel fundamental en la solución. Lo anterior implica buscar la forma que lleve a la unificación de criterios en la forma de realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases al aceite aislante de transformadores de potencia, teniendo en cuenta la experiencia del personal encargado de realizar esta prueba.

Con lo anteriormente mencionado se quiere dar a conocer que el tipo de sistema que se quiere implementar, aun no se utiliza por parte del área de mantenimiento de las empresas encargadas de la generación de corriente eléctrica, la forma como se realiza dicho análisis del aceite es por medio de la cromatografía, cosa que se quiere cambiar al momento de implementar la nariz electrónica para el análisis del aceite desde el transformador en tiempo real y poder hacer un monitoreo constante. Según estudios ya realizados hay ciertos tipos de fallos que se pueden detectar por medio del aceite de los transformadores, esos gases se presentan en ciertas cantidades, para la detección de ese tipo de gases se implementó dentro de la matriz de sensores presentes en la cámara de concentración sensores específicos para el análisis previo de cada uno de estos gases a analizar.

Este documento se encuentra estructurado de la siguiente manera, se basa como primera medida en la documentación adquirida por medio de la empresa prestadora de servicio de energía de Norte de Santander pro medio de la cual se pudo adquirir una muestra de aceite de dichos transformadores para su respectivo procesamiento, logrando así adquirir una base de datos e información necesaria para poder dar una solución desde el punto de vista de ingeniería, se llega a la conclusión de crear un dispositivo capaz de detectar los volátiles presentes dentro del aceite de los transformadores debido a que la presencia de ciertos gases se puede determinar fallas posibles de dichos dispositivos.

Luego de organizar cada una de las ideas antes mencionadas se logra plantear una metodología para llevar a cabo la elaboración de este proyecto como lo es el desarrollo de un dispositivo capaz de detectar los gases presentes en el aceite de los transformadores eléctricos empleando como principal elemento una nariz electrónica capaz de cumplir con dicha función.

Se plantea la problemática a resolver como se mencionó anteriormente, definiendo así el desarrollo de un dispositivo de uso primordial en los laboratorios de la universidad de Pamplona como lo es el headspace sampling cuyo funcionamiento es extraer los gases presentes en el espacio de cabeza de un vial donde se deposita la muestra, y se eleva a una temperatura considerable a la cual funciona normalmente un transformador eléctrico, este dispositivo se lleva a cabo por medio de estudiantes que integran el grupo de investigación GISM adscrito a la Universidad de Pamplona, una vez se realizan todas las pruebas pertinentes para dar el correcto funcionamiento a este dispositivo se prosigue con el análisis de las muestras de aceites en diferentes temperaturas, esta medida y análisis de los resultados obtenidos a raíz de la respuesta que se entrega al estímulo

que produjeron los sensores concentrados dentro de la nariz electrónica que se empleó para realizar este procedimiento la cual está diseñada con el fin de discriminar y caracterizar los tipos de gases presentes dentro de cada una de las muestras.

Cuando se obtiene una respuesta por parte de los sensores se aplica el método PCA es un método estadístico que permite simplificar la complejidad de espacios muestrales con muchas dimensiones a la vez que conserva su información, y como función o método final se procede a realizar la respectiva validación del sistema asegurando así su respectivo funcionamiento.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La necesidad y planteamiento del problema con el cual se inició la elaboración de esta investigación, surgió de implementar nuevas tecnologías a los procesos ya existentes en este caso el sector energético del departamento Norte de Santander, para proporcionar a cada uno de sus habitantes una energía más confiable y segura.

Actualmente la empresa encargada de suministrar la energía a este departamento cuenta con un personal altamente calificado para la revisión y mantenimiento de los transformadores, indagando y trabajando de la mano de ellos, nos dieron a conocer el laboratorio de cromatografía con el cual su personal capacitado hace el respectivo análisis del aceite de los transformadores y desde allí se determina qué posibilidad de fallo hay en dichos elementos y según este reporte se realiza un plan de trabajo con la cuadrilla de mantenimiento.

Como primera medida cada una de las empresas encargadas de este tipo de procedimientos debe tener unos protocolos establecidos para la ejecución y así plantear que tipo de mantenimiento se debe aplicar al transformador esto tiene como fines recuperar la disponibilidad del equipo en el mínimo tiempo posible, y maximizar su vida residual, minimizando el costo. Previamente debe planificarse con antelación la parada y desconexión de la red, recopilar información técnica con respecto al equipo, revisar el protocolo y los equipos de seguridad necesarios y seleccionar cuidadosamente el personal requerido, según sus conocimientos y aptitudes teniendo en cuenta lo anterior se plantean mantenimientos preventivos, predictivos y correctivos dependiendo del estado en el que se encuentren cada uno de los equipo revisados y analizados por el personal indicado para el desarrollo del mismo.

Si hablamos del mantenimiento preventivo el cual se aplica para evitar una parada de emergencia, este es rutinario y primordial para que el transformador pueda suministrar hasta el 100% de potencia sin riesgos y/o interrupciones y se basa en cinco acciones fundamentales: limpieza general, análisis químicos y físicos del aceite, mantener el nivel de éste, dar mantenimiento a los filtros de silicagel y realizar ensayos periódicos de los relés de gas o Buchholz. La necesidad de este mantenimiento se multiplica en función de los daños que podría ocasionar su parada por avería. Tratándose de costosos equipos, su revisión debe efectuarse con la periodicidad establecida en su proyecto de instalación, adecuándola en todo momento a su utilización, ubicación, si el mantenimiento preventivo del transformador muestra que posee problemas de humedad, gases combustibles o productos de la oxidación, fugas de aceite, puntos de oxidación, entre otros, deben realizársele ciertos trabajos correctivos, como la remoción de sedimentos y la desgasificación o deshidratación del transformador, para lo que se puede emplear calor, vacío o ambos. Un alto grado de desgasificación del aceite brinda algunos beneficios, tales como: remoción del oxígeno y gases combustibles. (*El Mantenimiento a Los Transformadores de Potencia ; Su Análisis En El Caso de Maintenance of Power Transformers ; Its Analysis in the Case of a Cuban Thermal*, 2011)

La mayoría de las fallas de los transformadores en aceite pueden ser atribuidas al deterioro de su sistema de aislamiento, lo que se atenúa si se mantiene un programa completo de mantenimiento preventivo periódico, orientado a combatir los factores (humedad, oxígeno, calor y contaminación) que inciden en su deterioro. Un transformador con su sistema de aislamiento adecuadamente mantenido, será capaz de soportar de una mejor manera problemas tales como las sobretensiones, por lo que, para el mantenimiento del transformador, deben tenerse en cuenta los factores que influyen en el deterioro del sistema de aislamiento, las pruebas y actividades de rutina que permiten emitir un criterio del estado del transformador, el significado de los resultados obtenidos en las pruebas, el momento en que deben realizarse las pruebas y las medidas correctivas que deberán tomarse en el caso de que se detecte alguna anomalía, por años, el mantenimiento preventivo de los transformadores ha estado basado en la determinación de la resistencia de su aislamiento junto con la medición de la rigidez dieléctrica del aceite. Sin embargo, se sabe ahora que pruebas como la medición de la tangente del ángulo de pérdidas del dieléctrico (tangente de  $\delta$ ) o del factor de potencia del aislamiento, el contenido de humedad, la tensión interfásica, la acidez, entre otras, son muy importantes para obtener un diagnóstico más acertado del estado del transformador.

A partir de la necesidad de reducir los tiempos de intervención sobre cada equipo, para obtener la mayor disponibilidad y basándose en la predicción y diagnóstico del estado de los transformadores, debe realizarse el mantenimiento predictivo, para encontrar pérdidas incipientes de las propiedades del aislamiento del transformador, a través de diversos ensayos y controles, lo que permitirá seleccionar el momento más adecuado para la reparación, mantenimiento correctivo o retiro del servicio, antes que se produzca una falla grave. No existe un único control o ensayo que permita obtener un diagnóstico del estado del aislamiento, salvo en casos muy puntuales. Es por ello que se requieren una serie de controles, no necesariamente simultáneos. El análisis periódico de los gases disueltos en el aceite de los transformadores, mediante cromatografía de gases (AGD, Análisis de Gases disueltos), es un método efectivo para el control previo al mantenimiento; se ha convertido en una herramienta poderosa a la hora de monitorear el estado en que se encuentra el transformador, sin necesidad de sacarlo de operación, por lo que ha pasado a ser muy importante dentro del mantenimiento periódico. El AGD sirve como base para el mejoramiento de las inspecciones y es indicador del envejecimiento, pero no constituye, de por sí sólo, un elemento determinante; en ocasiones, es insuficiente para diagnosticar e identificar anomalías internas de los transformadores, por lo que se hace necesario combinarlo con otros datos, como el historial de operaciones, pruebas eléctricas, inspecciones externas.

### 1.1.1 JUSTIFICACION

Los desarrollos tecnológicos de nuestros tiempos han contribuido al mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad, por ende, contribuir desde los conocimientos adquiridos como egresados de ingeniería, el proyecto está planteado para mejorar el rendimiento de los transformadores eléctricos y así colaborar a la empresa CENS quien presta los servicios de energía al departamento de Norte de Santander.

Los sistemas de potencia son los encargados de suministrar energía eléctrica a sus clientes con un grado aceptable de confiabilidad y calidad. La confiabilidad de un sistema de energía depende del adecuado funcionamiento de cada uno de los elementos que lo componen, entre ellos se encuentra el transformador de potencia. Durante el periodo de vida útil de un transformador, éste se puede ver afectado por diversos tipos de fallos (de pequeña o gran magnitud), que pueden manifestarse como esfuerzos de tipo eléctrico y mecánico en la máquina, los cuales van acompañados de la liberación de gases tales como: hidrogeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), entre otros, que quedan disueltos en el aceite o en el manto de gas. En la tabla a continuación se presenta la clasificación del tipo de material involucrado en los diferentes tipos de falla y los gases producidos:

**Tabla 1 Gases presentes en el aceite según el tipo de falla (De, 2010)**

Origen de la avería	Gas Clave	Porcentaje de gas presente	Gráfica														
Arco	Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	CO: <0.1% H <sub>2</sub> : 60% CH <sub>4</sub> :5% C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> :1.6% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 3.3% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 30%	<table border="1"> <caption>Data for Arc Fault Gas Chart</caption> <thead> <tr> <th>Gas</th> <th>% Combustible</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>&lt;0,01</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>1,6</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>3,3</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>30</td> </tr> </tbody> </table>	Gas	% Combustible	CO	<0,01	H <sub>2</sub>	60	CH <sub>4</sub>	5	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,6	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3,3	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	30
Gas	% Combustible																
CO	<0,01																
H <sub>2</sub>	60																
CH <sub>4</sub>	5																
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,6																
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3,3																
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	30																
Corona (Descargas parciales)	Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	CO: 0.2% H <sub>2</sub> : 86% CH <sub>4</sub> :13% C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> :0.5% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 0.2% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 0.1%	<table border="1"> <caption>Data for Corona Fault Gas Chart</caption> <thead> <tr> <th>Gas</th> <th>% Combustible</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>86</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table>	Gas	% Combustible	CO	0,2	H <sub>2</sub>	86	CH <sub>4</sub>	13	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,5	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,2	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,1
Gas	% Combustible																
CO	0,2																
H <sub>2</sub>	86																
CH <sub>4</sub>	13																
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,5																
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,2																
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,1																

Origen de la avería	Gas Clave	Porcentaje de gas presente	Gráfica														
Sobrecalentamiento del aceite	Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	CO: <0.01% H <sub>2</sub> : 2% CH <sub>4</sub> : 16% C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : 17% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 63% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 2%	<table border="1"> <caption>Data for Oil Overheating Gas Chart</caption> <thead> <tr> <th>Gas</th> <th>% Combustible</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>&lt;0,01</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>63</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Gas	% Combustible	CO	<0,01	H <sub>2</sub>	2	CH <sub>4</sub>	16	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	17	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	63	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2
Gas	% Combustible																
CO	<0,01																
H <sub>2</sub>	2																
CH <sub>4</sub>	16																
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	17																
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	63																
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2																
Sobrecalentamiento de la celulosa	Monóxido de carbono (CO)	CO: 92% H <sub>2</sub> : 6.7% CH <sub>4</sub> : 1.2% C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : <0.01% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : <0.01% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : <0.01%	<table border="1"> <caption>Data for Cellulose Overheating Gas Chart</caption> <thead> <tr> <th>Gas</th> <th>% Combustible</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>92</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>6,7</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>1,2</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>&lt;0,01</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>&lt;0,01</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>&lt;0,01</td> </tr> </tbody> </table>	Gas	% Combustible	CO	92	H <sub>2</sub>	6,7	CH <sub>4</sub>	1,2	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	<0,01	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	<0,01	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	<0,01
Gas	% Combustible																
CO	92																
H <sub>2</sub>	6,7																
CH <sub>4</sub>	1,2																
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	<0,01																
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	<0,01																
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	<0,01																

Actualmente para realizar el diagnóstico de estas fallas se debe acudir a laboratorios especializados, donde se hacen las pruebas de tipo espectrometría de masas y cromatografía de gases las cuales cuantifican la presencia de estos volátiles para clasificar la falla que están presentando los elementos. La nariz electrónica se ha venido empleando en paralelo con la cromatografía de gases, esta es una aplicación muy interesante pues se puede diseñar e implementar una metodología que permita la clasificación de los fallos presentes en el transformador sin necesidad de desmontar todo el elemento y trasladarlo a un laboratorio especializado, esto significaría ahorros en el momento de mantenimiento y mejorar el servicio de energía eléctrica.

A partir del planteamiento del problema que surgió para la creación del dispositivo capaz de discriminar los gases insipientes en los transformadores eléctricos surge la idea de poder emplear una nariz electrónica como dispositivo para implementar en el diagnóstico de fallas de un transformador de potencia por medio de los gases presentes en el aceite

Se decide emplear este tipo de método de clasificación y discriminación de los gases por medio de la nariz electrónica como el elemento encargada de realizar este procedimiento, debido a que por medio de diferentes dispositivos electrónicos que se vienen empleando en diferentes sectores de la industria como detectores de fallas, como de calidad de los productos, esto se hace asemejando los sentidos de percepción de los seres humanos como medio de detección de diferentes factores normales dentro de su ciclo de vida siendo indispensables para poder detectar tanto sabores como olores dentro del desarrollo normal de la vida cotidiana de un ser humano, por ello se está tomando

como referencia tanto las nariz como la lengua en forma de dispositivo electrónicos capaces de cumplir su función semejando a la capacidad que tienen cada uno de estos órganos haciendo así una analogía con respecto al trabajo que se quiere que ellos cumplan.

La nariz electrónica se considera parte de un área de investigación llamada biomímesis, que no es otra cosa que aplicar esquemas de funcionamiento o actuación propios de la naturaleza y los seres vivos a herramientas mecánicas o electrónicas creadas por el hombre. En el caso que nos ocupa, las narices electrónicas pretenden ser sensores de olor que puedan percibir olores con el mismo grado de fiabilidad que lo hace la nariz humana. Aunque, de partida, este concepto tiene algunos problemas, como es el componente subjetivo que nuestro cerebro aplica a cualquier análisis de información. Es decir, la sensación que nos provoca un olor y el significado que le atribuimos está basado, en parte, en nuestras experiencias y en cómo nuestro cerebro interpreta ese olor percibido por comparación con su "base de datos".

La nariz electrónica se define como un instrumento dotado de sensores químicos y de un programa químico métrico de reconocimiento de modelos, que es capaz de reconocer y comparar olores individuales o complejos. Haciendo comparación con un sistema olfativo humano, su objetivo es relacionar el aroma que se percibe con una respuesta que, tras ser almacenada en la memoria, servirá como modelo en ulteriores análisis, es por eso que se toma la decisión de aplicar como nueva tecnología la nariz electrónica dentro del proceso de detección de fallos en un transformador de potencia ya que se debe obtener información de cada uno de los gases que emana el aceite de los mismo cuando sufren un sobrecalentamiento y así poder detectar cada uno de los químicos presentes y poder hacer el proceso de la clasificación de los mismos.

## **1.1.2 OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Desarrollar un sistema multisensorial embebido para detección de fallas insipientes en transformadores eléctricos

### **1.1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICO**

- Diseñar un sistema multisensorial que permita simular las condiciones de funcionamiento de los transformadores y asegure el manejo y extracción de los gases.
- Construir el sistema de extracción y manejo de muestras de aceite, utilizados por los transformadores en su sistema interno de funcionamiento.
- Implementar el sistema multisensorial para la adquisición de las señales provenientes de la reacción de los sensores de gases ante las diferentes muestras de aceite en laboratorio.
- Desarrollar un algoritmo que permita discriminar el conjunto de señales adquiridas para respectiva clasificación.
- Validar el funcionamiento del sistema de adquisición de datos y el algoritmo de clasificación.

# CAPITULO 2

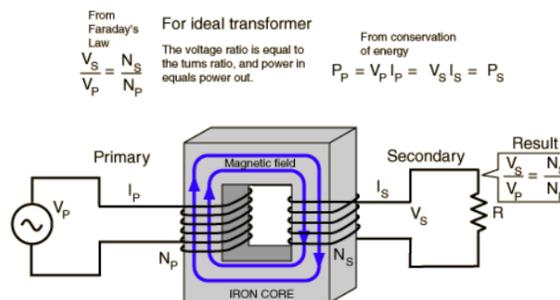
## 2 MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hace una contextualización de los temas de mayor relevancia dentro de la investigación del proyecto en mención con el fin de poder entender más a fondo la temática que en esta investigación se abordan, como lo es el análisis de gases por medio de la cromatografía, y poder aplicar este mismo método por medio de una nueva tecnología, como lo es las narices electrónicas donde se realiza el mismo procedimiento que un cromatógrafo convencional y sería un método más rápido y con la misma efectividad, partiendo del análisis y resultados de obtenidos, se puede determinar los fallos presentes en los transformadores, debido a que cada uno de los gases analizados nos dan data de los fallos internos del mismo.

En el estado del arte se muestran investigaciones similares donde se resaltan los resultados y la metodología seguida por los investigadores, se destacan principalmente las mejores formas de implementar, y cada uno de los procesos a los cuales los cromatógrafos sirven como medida de análisis y debido a este tipo de análisis y resultados se dará a conocer si en algún proceso diferente al que está siendo objeto de nuestro estudio se aplica una nueva tecnología para el análisis de estos gases por medio de este tipo de metodología.

### 2.1 MARCO TEORICO

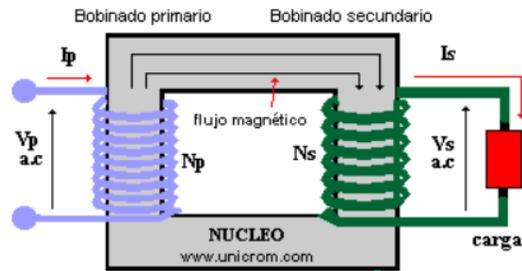
Un transformador hace uso de la **ley de Faraday** y de las propiedades ferromagnéticas de un núcleo de hierro para subir o bajar eficientemente el voltaje de corriente alterna (AC). Por supuesto no puede incrementar la potencia de modo que, si se incrementa el voltaje, la corriente es proporcionalmente reducida, y viceversa (*El Transformador El Transformador  $P_i = P_s$* , n.d.).



**Figura 1 funcionamiento de un transformador (“El Transformador El Transformador  $P_i = P_s$ ,” n.d.).**

El transformador es un dispositivo que se encarga de "transformar" el voltaje de corriente alterna que tiene a su entrada en otro de diferente amplitud, que entrega a su salida. Se compone de un núcleo de hierro sobre el cual se han arrollado varias espiras (vueltas) de alambre conductor. Este conjunto de vueltas se llaman bobinas y se denominan:

- Bobina primaria o "primario" a aquella que recibe el voltaje de entrada y
- Bobina secundaria o "secundario" a aquella que entrega el voltaje transformado.



**Figura 2 Funcionamiento de las bobinas del transformador (“El Transformador El Transformador  $P_i = P_s$ ,” n.d.).**

La bobina primaria recibe un voltaje alterno que hará circular, por ella, una corriente alterna. Esta corriente inducirá un flujo magnético en el núcleo de hierro. Como el bobinado secundario está arrollado sobre el mismo núcleo de hierro, el flujo magnético circulará a través de las espiras de éste. Al haber un flujo magnético que atraviesa las espiras del "Secundario", se generará por el alambre del secundario un voltaje (**ley de Faraday**). En este bobinado secundario habría una corriente si hay una carga conectada (por ejemplo, a una resistencia, una bombilla, un motor) (**García Vélez, 2010**).

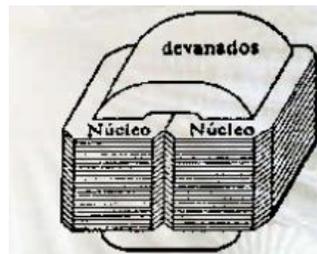
### 2.1.1 COMPONENTES BASICOS DE UN TRANSFORMADOR:

En el desarrollo y perfeccionamiento de los transformadores han influido varios factores. Las propiedades físicas de los materiales de que están contruidos han mejorado en gran manera, particularmente los aislantes y materiales magnéticos para los núcleos. La experiencia ha llevado a un empleo más eficaz de los materiales disponibles y a mejorar los métodos de ensamble de los mismos. Adicionalmente, los aceites actuando como medio de refrigeración y aislantes han facilitado la construcción de grandes transformadores de potencia de alta tensión (brettis, 2013a).

El servicio que debe realizar un transformador determina las características físicas de su construcción. Los componentes generales son:

- **NUCLEO**
- **DEVANADOS**

#### 2.1.1.1 NUCLEO:



**Figura 3 Núcleo de un transformador (brettis, 2013).**

El núcleo de los transformadores está formado por chapas (láminas) delgadas de hierro magnético al silicio. En todos los transformadores el núcleo es asegurado por una estructura de prensado que permite reducir las vibraciones, el nivel de ruido y las corrientes de excitación, evitando el consecuente calentamiento por dichos fenómenos. Los dos tipos fundamentales de estructura de transformador son el tipo de núcleo, en el cual dos grupos de devanados abrazan a un núcleo único, y el tipo acorazado, en el cual un único grupo de devanados abraza, al menos, dos núcleos dispuestos en paralelo. Una modificación de este tipo es el llamado tipo acorazado distribuido, corrientemente empleado en transformadores de distribución. Para transformadores de potencia y algunos de distribución para alta tensión se utiliza con frecuencia la estructura tipo de núcleo.

#### 2.1.1.2 DEVANADOS:



**Figura 4 Devanados de un transformador**

Los devanados de los transformadores sumergidos en aceite son en general de cobre electrolítico y, en algunos casos especiales, de aluminio. Dependiendo del tipo de bobina pueden tener forma redonda, rectangular o en fleje y, cuando se requiere, las soldaduras son en plata. En los transformadores pequeños para baja tensión se emplea hilo redondo, pero en los transformadores grandes los conductores suelen ser rectangulares. La elección del material de los devanados está influenciada por su costo. El oro y la plata son mejores conductores de electricidad que el cobre, pero en el caso de la plata su costo es unas 50 veces mayor comparado con el del cobre. Por sus excelentes características conducción/costo el cobre es el metal de uso casi exclusivo en los devanados de los transformadores (brettis, 2013b).

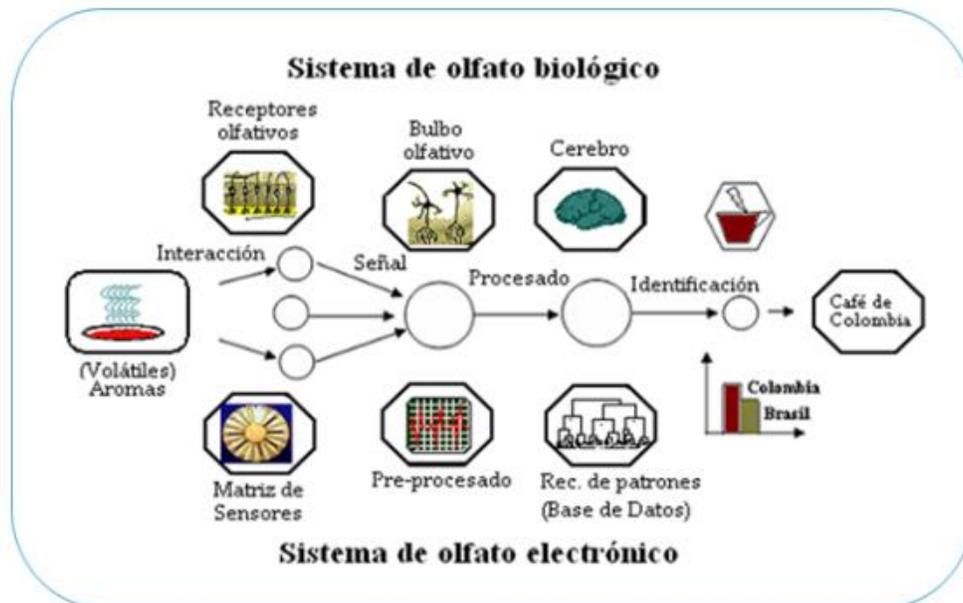
#### 2.1.2 NARIZ ELECTRÓNICA

Los sistemas multisensoriales son una investigación que data ya de aproximadamente 30 años pero que ha tenido un gran auge en los últimos años desarrollando nuevos productos y encontrando aplicaciones que en otro momento no sería posible realizarlas. Un sistema multisensorial está basado en sensores, los cuales pueden intentar imitar el comportamiento de los sentidos en el ser humano, el olfato y el gusto.

En el artículo "Cascade of Artificial Neural Network Committees for the Calibration of Small Gas Commercial Sensors for NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> and CO" nos habla de los efectos tóxicos y gases contaminantes que producen grandes problemas de salud para varias organizaciones internacionales, como la Unión Europea. Hoy en día las mediciones de estos gases son realizadas con estaciones costoso y engorroso basada principalmente

en métodos ópticos. La posibilidad de utilizar pequeños, comerciales, más baratos y mucho más sensor autónomo basado en capas de óxido de metal resistente es muy prometedor (Aleixandre et al., 2014).

Durante los años 80 los investigadores se centraron en una maquina olfativa que sería llamada nariz electrónica, un instrumento compuesto de un arreglo de sensores que permitían reconocer algunos olores o compuestos físico, una gran variedad de sensores ha sido desarrollada teniendo como base tres materiales muy usados, metal-oxido, polímeros y sensores enzimáticos(Ortiz et al., 2016).



**Figura 5 Analogía entre olfato humano y nariz electrónica.**

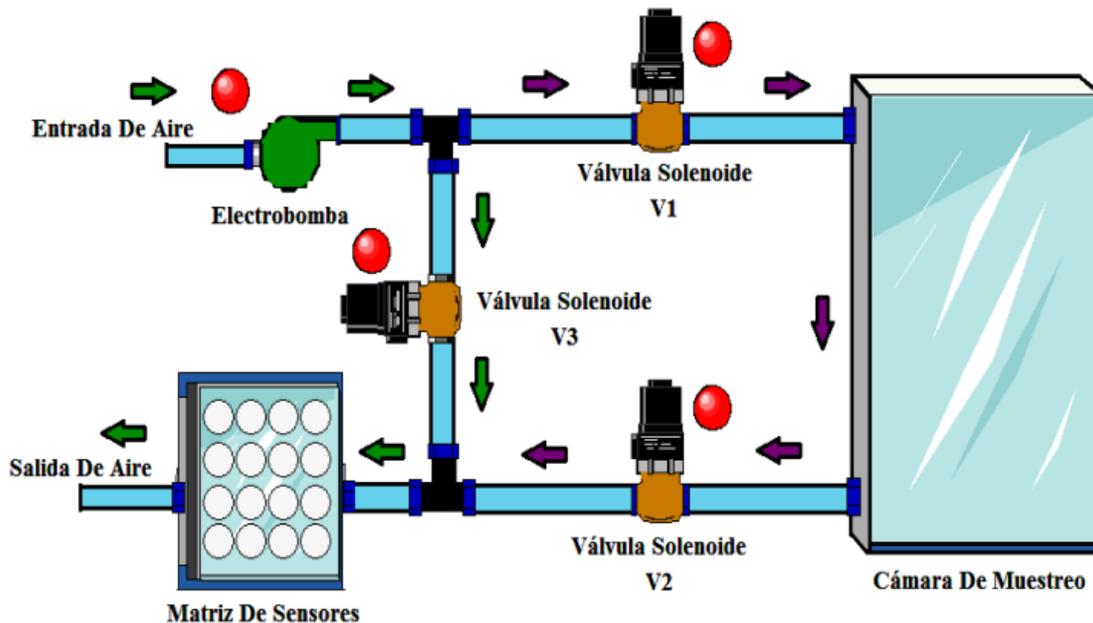
Estos sistemas constantemente se están comparando con los espectrómetros o cromatógrafos, como en estos instrumentos una vez que se adquiere la información que podemos denominar data, esta es analizada y procesada por diferentes técnicas:

- Análisis de componentes principales.
- PLS.
- Análisis de discriminación funcional.
- Análisis de clúster.
- Lógica difusa.
- Redes neuronales.

Desde 1993 se han publicado aproximadamente 12000 artículos de las aplicaciones de las narices electrónicas en la industria alimenticia, los trabajos realizados tienen que ver con el pescado, la carne, la leche, el vino, café y té, donde las investigaciones buscan en muchos momentos determinar variedades de alimentos, frescura, adulteración, olor y detección de bacterias uno de los procesos más complejos existentes.(Eduardo et al., 2016).

En términos generales la nariz electrónica es un dispositivo compuesto por cuatro etapas funcionales:

- Concentración de los volátiles.
- Captura de los volátiles.
- Electrónica de control.
- Procesamiento de la información



**Figura 6 Esquema General de la B-Nose (Eduardo et al., 2016)**

Se toma como contexto este esquema debido a que es el medio donde se realizaron las pruebas de la concentración de los volátiles presentes en el aceite de los transformadores, muestra que fue suministrada por la empresa de energía de Norte de Santander CENS, en resumen este módulo está basado en la generación y control de un flujo de aire que dirige los volátiles provenientes del head space sampling que fue el elemento que se utilizó para realizar el calentamiento de la muestra de aceite a diferentes temperaturas buscando con esto simular la temperatura interna de cada uno de los transformadores y poder adquirir datos más exactos en cuanto a la forma de trabajo de los mismos, por este motivo, el sistema de muestreo consta de las tradicionales cámaras de concentración y medida más cuatro electroválvulas y una bomba de aire, después de tomada cada muestra se debía hacer una limpieza tanto en la aguja que ingresaba al vial, como la manguera que permitía la conducción de los volátiles, esta limpieza se realizaba con aire limpio proveniente de un nebulizador médico.

Cuando el sistema se encuentra en la fase de concentración, la bomba toma el aire del laboratorio y las electroválvulas lo conducen a través de la cámara de medida. El flujo de aire abandona el sistema y es devuelto al exterior sin circular a través de la cámara de concentración, ya que las electroválvulas han cerrado dicho camino con la finalidad de que se acumulen volátiles en su interior, esto se observa en la figura siguiendo las flechas

verdes. Esta fase puede durar unos 15 a 30 minutos, tiempo suficiente para acumular una gran concentración de volátiles y así obtener una buena señal de los sensores.

Durante la fase de medida, la bomba de aire empuja los volátiles a través de un circuito cerrado desde la cámara de concentración a las de medida. Durante dicha etapa el aire del exterior circula a través de la cámara de muestreo y por la de medida la cual contiene la matriz de sensores terminando de esta manera el recorrido saliendo expulsados fuera del circuito y del laboratorio esto se muestra mediante flechas violetas en la figura. Para esta fase un tiempo total de 10 minutos es considerado adecuado para el respectivo análisis.

### **2.1.3 SENSORES**

El diseño de los biosensores y la optimización de su desempeño puede mejorarse usando sistemas mono-enzimáticos basados en el hidrolisis del acetileno. En este caso la detección es basada en la oxidación de la tiocolina producida en un electrodo de platino, usando como aproximación que el potencial aplicado es tan bajo que permite monitorear la oxidación del peróxido de hidrogeno podemos encontrar también los micro sensores de polímero, cuyas propiedades físicas y eléctricas son alteradas en presencias de ciertos volátiles, un arreglo de estos sensores podría detectar fácilmente por cambios en la conductancia diferente tipo de componentes además de que en sus ventajas podemos enumerar que pueden operar en temperatura ambiente, son muy estables, su rango de aplicación es bastante alto y posee también una alta sensibilidad.

También aparecen los sensores de metal-oxido (MOS), ellos están basados en elementos semiconductores que muestran un cambio de resistividad al exponerse a ciertos compuestos, las ventajas de estos sensores es que tienen una baja respuesta a los cambios humedad, un periodo muy largo de actividad sin daño y un gran rango de aplicaciones.

Se analizan también para este proyecto cuya investigación se centra en la posibilidad de detectar pesticidas en una nariz electrónica los sensores BAW (bulbo de onda acústica), son dispositivos piezoeléctricos basados en cristales osciladores unidos con diferentes materiales que permitan analizar los cambios de la frecuencia en presencia de diversos componentes, son capaces de manejar diferentes tipos de volátiles, estables en cambios de temperatura y baja sensibilidad a cambios de humedad.

De estos tipos de sensores los más usados en los sistemas multisensoriales son los MOS y los CP, cada fabricante crea sensores de diferentes tipos, y la elección se realiza dependiendo del tipo de muestra que se vaya a analizar, en la tabla 1 extraída del artículo de investigación “Aplicación narices electrónicas para revisión de calidad en producción de plantas medicinales y aromáticas” podemos encontrar diferentes sistemas multisensoriales fabricados, los tipos de sensores que utilizan, su número y el país de fabricación.

<b>Modelo</b>	<b>Numero de sensores</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Fabricante</b>	<b>País</b>
QCS	2	MOS	Gerstel	Alemania
Artinose	38	MOS	Sysca	Alemania
FOX 2000	6	MOS	Alpha MOS	Francia
Air Quality Module	2	MOS	Applied sensor	Suecia
Aromascan A32S	32	CP	Osmetech	USA
Cyranose 320	32	CP	Intelligen Optical System	USA

Tabla 1. Narices electrónicas comerciales y sus sensores

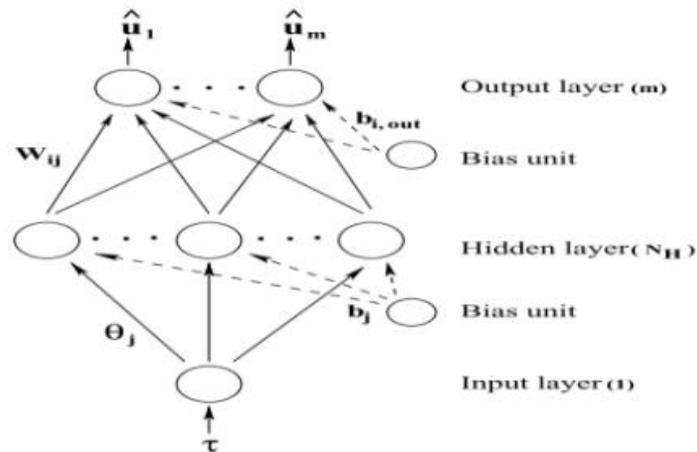
En algunas fábricas o universidades también se acostumbra en los sistemas de narices electrónicas emplear diferentes tipos de sensores lo que incluye diferente fabricante, tecnología, aplicaciones, etc., esto con el objetivo de tener una respuesta única ante la presencia de cada muestra y al momento de realizar el procesamiento de la información sea mucho más sencillo encontrar patrones que permitan consolidar la respuesta del sistema.

El procesamiento de la información es una de las partes más críticas de los sistemas multisensoriales, pues, aunque se tenga una buena respuesta de los sensores el resultado es producto de que se estructure la clasificación y reconocimiento de los patrones de cada una de las muestras.

#### **2.1.4 REDES NEURONALES**

Las redes neuronales (ANN) es una técnica de procesamiento de información inspirada en la habilidad del cerebro humano. La ANN requiere un entrenamiento para poder concebir las relaciones entre las entradas y salidas de la información, también tiene el poder de predecir comportamiento o estados de información.(Moreno et al., 2009).

Una de las principales fortalezas de las redes neuronales es su capacidad de aproximar funciones no lineales, que puede ser explotado en los campos de control en el tiempo, o en optimización de problemas. Una de las elecciones más difíciles de realizar es decidir la arquitectura de la red que se va a implementar, en ellos encontramos capa única, o múltiples capas.



**Figura 7 Arquitectura de una red neuronal.**

En la figura 6, podemos observar la arquitectura de una red neuronal partiendo de una entrada, una capa oculta, los umbrales y la capa de salida. Debido a que la red neuronal es una aproximación de funciones universal nos puede ayudar a hacer predicciones u otro tipo de clasificaciones que son de gran ayuda en este tipo de proyectos.

Según sus arquitecturas se pueden encontrar redes Perceptron, Multicapa perceptron, PNN y RBF entre muchas otras, una muy interesante es la RBF pues en ella la capa de entrada está compuesta de nodos conectados a la segunda capa, donde se aplica una transformación espacial, y por último la capa de salida es lineal quien es la que produce la respuesta de la red a través de una función de activación. La función principal en este tipo de redes es la Kern el Gaussiana, y el número de nodos que se utilizan dependen directamente de la data adquirida, en el entrenamiento creamos las clases que son las que permiten la transformación dentro de la red neuronal.

Las redes neuronales tipo Backpropagation es una herramienta muy usada para el modelado de complejos sistemas y se han utilizado en áreas de investigación e industrialmente. Su método de funcionamiento es el de ajustar los pesos de las neuronales elegidos aleatoriamente, que es un grupo de nodos organizados en sistemas de una o múltiples capas. Esta característica permite aprovechar estas redes neuronales cuando sabemos que hay una relación directa entre la entrada y salida, a pesar de que existan parámetros desconocidos su arquitectura le permite predecir y tomar formas funcionales.

Este algoritmo de entrenamiento puede tomar muchas iteraciones de entrenamiento para encontrar los pesos adecuados dependiendo del tipo de datos, entradas y salidas que se están ajustando. También se identifica que existen métodos evolutivos que pueden ser aplicados para el entrenamiento de las redes neuronales, como la mutación de las capas, funciones de aplicación, uno de estos métodos muy utilizado es el Annealing, en este método el estado de un sistema es proporcionado por un valor hipotético de energía, basado en el rendimiento del sistema, el error calculado entre el valor predicho y el valor real.

Es posible encontrar el cruce entre varios tipos de inteligencia artificial, como lo es el control difuso y las redes neuronales llamado ANFIS, este tipo de técnica inteligente es un clasificador que puede ser utilizado con grandes cantidades de información usando la inferencia difusa, es muy fuerte debido que su estructura interna de membrecías y pesos, pero muy susceptible a señales de ruido o en sistemas caóticos, también tiene la desventaja que su resultado es completamente proporcional a los parámetros definidos por el programador.

En los sistemas multisensoriales es muy utilizada como herramienta de procesamiento la inteligencia artificial y proyectos en los que se ha demostrado su excelente comportamiento, uno de esos ejemplos puede ser la discriminación los volátiles emitidos por las plantas, donde incluso estas sustancias químicas son disparadas únicamente en respuesta a ataques de herbívoros, usando una nariz electrónica se busca encontrar la concentración de este tipo de componentes y para poder lograrlo se utilizada una red neuronal (BPNN), cuyo resultados indican que la nariz electrónica puede discriminar los tipos de plantas relacionados con el daño de las sustancias químicas.

Como resumen de las redes neuronales se puede afirmar que son un algoritmo matemático con la capacidad de relacionar entradas y salidas, aprendiendo de ejemplos a través iteraciones y buscando relaciones entre las variables del proceso.

### **2.1.5 DGA:**

Los transformadores de potencia, son bastante caros, deben ser supervisados cuidadosamente en todas las partes de su operación. El diagnóstico de falla de ello es importante para la seguridad del dispositivo y el sistema del sistema de potencia. El estudio en las décadas pasadas ha demostrado que los gases disueltos en el aceite son relacionados estrechamente con fallas internas. El análisis disuelto de gas (DGA) ha ganado la aceptación mundial como un método diagnóstico para la detección del transformador interno (Lv et al., 2005).

### **2.1.6 CROMATOGRAFÍA DEL ACEITE DE LOS TRANSFORMADORES**

Cuando se realiza el análisis del aceite de los transformadores eléctricos lo que sucede es según **(Electric, 2007)** el análisis de gases disueltos (DGA) es una técnica de diagnóstico muy útil en el mantenimiento preventivo, evaluación de las condiciones e identificación de fallas de transformadores en aceite (equivale a un análisis de sangre en los transformadores como parte de un examen físico de rutina). El análisis determina la cantidad de gases disueltos en el aceite: hidrógeno, gases hidrocarburos (metano, etano, etileno, acetileno, y a veces propano, propileno, n-butano e isobutano), óxidos de carbono (monóxido y dióxido de carbono), oxígeno y nitrógeno. Donde se informa que la presencia de estos gases en el aceite se debe al envejecimiento (son típicamente hidrógeno y gases hidrocarburos), descomposición térmica (descomposición del aislamiento de papel (celulosa) son típicamente hidrógeno, óxidos de carbono y metano), operación de fusibles o llaves, por defectos eléctricos o durante eventos anormales. Diferentes tipos de fallas generan gases con su propia marca característica y

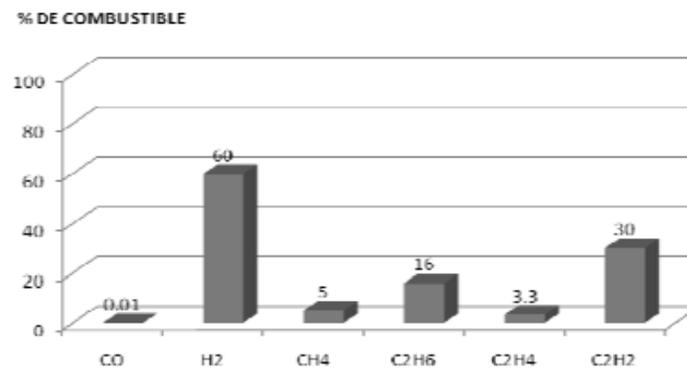
proporciones el tiempo de la vida útil de un aceite aislante no se puede medir en tiempo propiamente pues su degradación depende de las condiciones de operación, del régimen de carga del transformador, de su diseño, de la composición del aceite aislante, de su contenido de inhibidos natural y/o sintético.

Sin embargo, otros sugieren que la vida útil de un aceite aislante se defina como el tiempo durante el cual el aceite alcanza un Número de Neutralización de 3,0mg KOH/g, este valor se alcanza dependiendo de la cantidad de aire disuelto en el aceite, la hidrólisis del agua presente en el transformador, la descomposición de la celulosa y de una manera significativa y directa la temperatura del transformador **(García Vélez, 2010)**.

Se debe tener en cuenta la vida útil y el papel tan importante que cumplen el aceite en los transformadores de potencia una de sus principales funciones es según **(De, 2010)** es un componente muy importante dentro del sistema de aislamiento del transformador y para que cumpla con su función de aislante dieléctrico y refrigerante, éste debe contar con diferentes propiedades tales como con una rigidez dieléctrica suficientemente alta para resistir las sollicitaciones eléctricas que se presentan en el servicio, una viscosidad adecuada para asegurar la circulación convectiva y facilitar la transferencia de calor, un punto de escurrimiento bajo, que asegure la fluidez del aceite a bajas temperaturas, una buena estabilidad a la oxidación, un bajo factor de potencia, una estabilidad química y física y de preferencia un bajo costo. Las fallas que se pueden presentar y detectar por medio de los gases emanados por el aceite son el efecto corona, Pirolisis de aceite, Descargas parciales, Punto caliente, Pirolisis de la celulosa **(De, 2010)**.

- **Efecto corona**

Al haber falla de corona en el aceite, se tendrá suficiente energía para producir hidrógeno, ya que lo enlaces carbono-hidrógeno requieren relativamente poca energía para romperse. De menor cantidad, pero siendo este el gas característico se produce Acetileno ( $C_2H_2$ ) y pequeñas cantidades de Metano ( $CH_4$ ) y Etileno ( $C_2H_4$ ). También se pueden formar Monóxido y Dióxido de Carbono si la falla afecta a la celulosa.



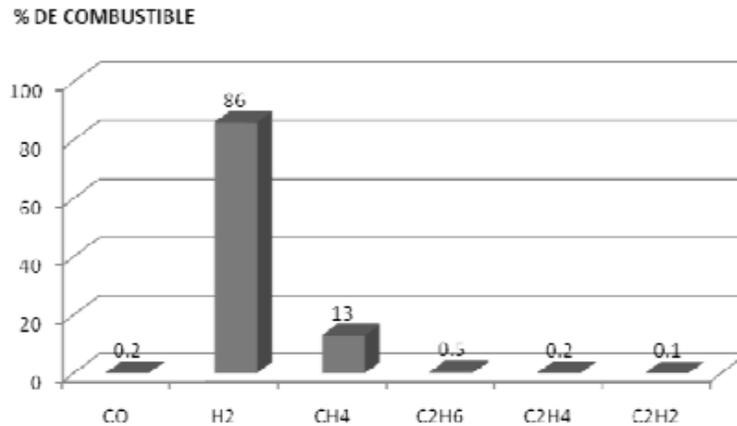
**Figura 8 Gas clave Acetileno ( $C_2H_2$ ).**

- **Pirólisis de aceite**

En este tipo de falla se pueden distinguir dos etapas, la de alta y la de baja temperatura, dependiendo de la cantidad relativa de energía que se esté disipando. En baja temperatura se pueden romper enlaces interiores carbono-carbono en la molécula del aceite formando Metano y Etano. Con alta temperatura, los gases carbono- hidrógeno del Etano se rompen y se forma un doble enlace para producir Etano e Hidrógeno.

- **Las descargas eléctricas**

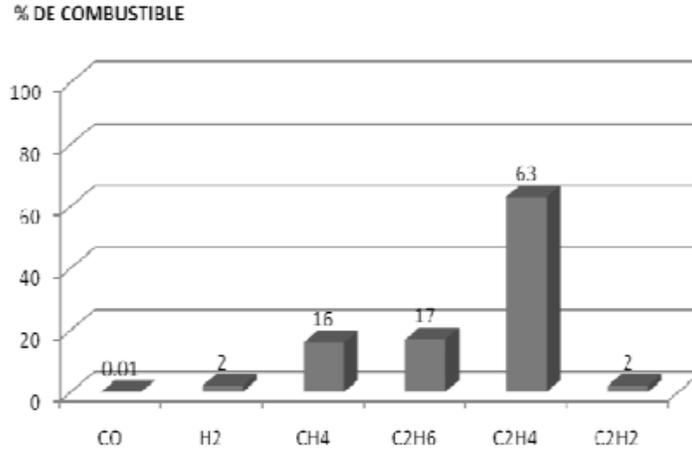
De baja energía producen Hidrógeno (H<sub>2</sub>) y Metano (CH<sub>4</sub>), con pequeñas cantidades de Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) y Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>). Si las descargas ocurren en la celulosa, pueden resultar cantidades comparables de Monóxido y Dióxido de Carbono.



**Figura 9 Gas clave Hidrógeno (H<sub>2</sub>).**

- **Punto caliente:**

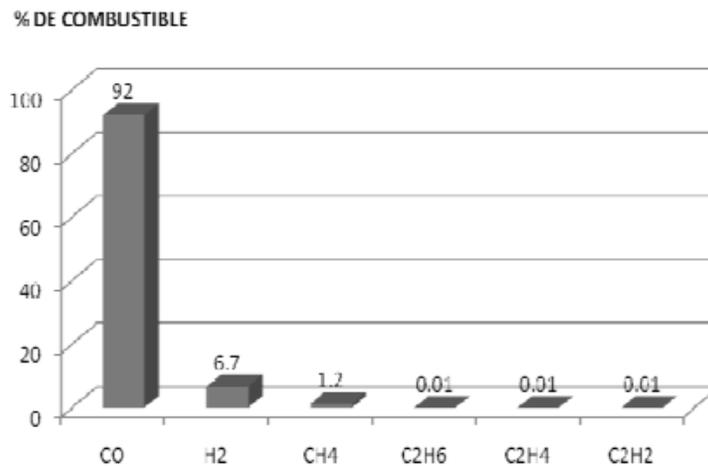
La energía térmica suministrada por una situación anormal como un punto caliente, provocará la descomposición del aceite con un incremento notable de los gases, más la presencia de Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) en mayor concentración que el Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). Los productos de la descomposición incluyen Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) y Metano (CH<sub>4</sub>), junto a cantidades menores de Hidrógeno (H<sub>2</sub>) y Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). Si las fallas son graves o si afectan a contactos eléctricos, pueden formarse indicios de Acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>).



**Figura 10 Gas clave Etileno (C2H4).**

- **Pirólisis de la celulosa**

La celulosa del papel es termodinámicamente inestable, es decir, siempre se está descomponiendo en presencia de calor, sin embargo, en operación normal de un transformador el deterioro es lento. La celulosa es un compuesto relativamente complejo, sin embargo, los productos de su descomposición son bastante sencillos, como el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), agua (H<sub>2</sub>O) y hasta Monóxido de Carbono (CO), si es que la degradación es rápida y el contenido de Oxígeno (O<sub>2</sub>) es pequeño. Cantidades considerables de Dióxido y Monóxido de Carbono presentes en el aceite pueden ser señal clara de un deterioro en la celulosa o que una falla está involucrada a la misma, por tal razón, es preciso vigilar las relaciones entre Dióxido/Monóxido y Monóxido/Dióxido, ya que un valor alto en la primera relación puede indicar oxidación del papel a alta temperatura en presencia de suficiente cantidad de Oxígeno ( O<sub>2</sub>), mientras que un valor alto en la segunda relación puede señalar que la celulosa se está descomponiendo rápidamente.



**Figura 11 Gas clave Monóxido de Carbono (CO).**

Existen variadas condiciones que causan la generación o combinación típica de gases en el aceite, con estas ideas podemos establecer interpretaciones que correlacionen el contenido de gases con el comportamiento del transformador. Con el fin de realizar la detección de fallas incipientes en su más temprana presencia y la capacidad de evaluar pequeños cambios aparentemente insignificantes en los rangos de los gases clave, se puede llegar a dar un correcto mantenimiento al transformador antes de que se altere la operación del equipo este sería unos de principales objetivos de llevar a cabo el desarrollo de dicho proyecto de investigación (De, 2010), (ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS PARA EL, 2014).

Uno de los métodos utilizados hoy en día para la detección de los gases presentes en los aceites de los transformadores es la cromatografía de gases por medio del cual es un método físico de separación de mezclas en el cual los componentes a ser separados son distribuidos entre dos fases, una de las cuales es estacionaria mientras la otra se mueve en una dirección definida. El movimiento de las sustancias durante la cromatografía es el resultado de dos fuerzas contrarias; la fuerza de arrastre de la fase móvil y la fuerza resistente o acción de retardo del adsorbente ubicado en la fase estacionaria. La fuerza de arrastre mueve las sustancias del origen de la columna en dirección del flujo de la fase móvil mientras que la acción de retardo impide el movimiento de las sustancias arrastrándolas del flujo y adhiriéndolas al adsorbente. Las moléculas se encuentran alternando entre mantenerse pegadas al adsorbente o ser arrastradas por el flujo, esto da como consecuencia que, pese a que el flujo es constante, solo una fracción de las moléculas se están moviendo.

### 2.1.7 HEADSPACE SAMPLING

En la figura se ilustra el diseño de un headspace sampling “tipo estático” para la extracción de los VOC’S y posterior inyección a un Sistema de Percepción Multisensorial. En el muestreo de espacio de cabeza estático la muestra debe ser termostática y debe permitir alcanzar una situación de equilibrio. La muestra del espacio de cabeza es más pequeña en comparación con el volumen total del espacio de cabeza, se determinan concentraciones en el intervalo ppm-ppb o aún menores.

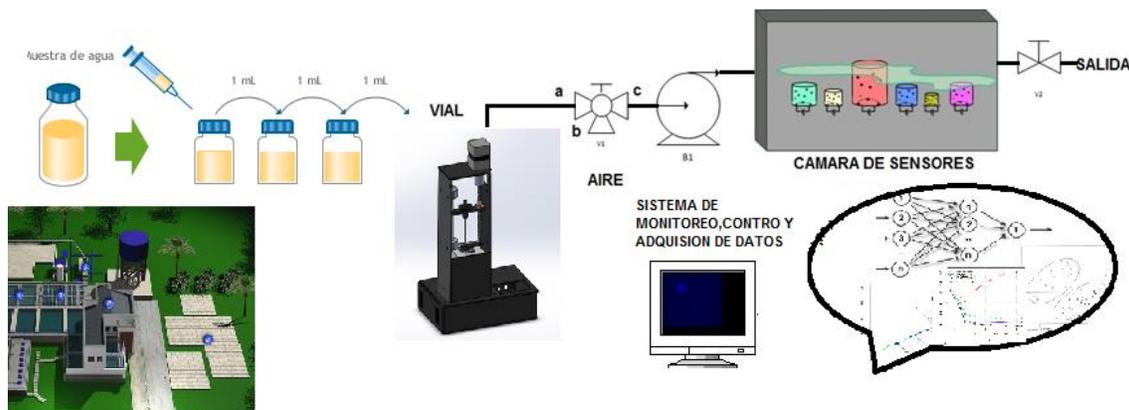


Figura 12 Proceso de inyección de la muestra y procesamiento de datos

## 2.2 ESTADO DEL ARTE

Durante la investigación del estado del arte sobre el tema en mención se pudo observar que como tal un proyecto muy relacionado con el que se desarrolló no se tiene información, si hay muchos proyectos relacionados en cuanto al desarrollo de los prototipos de olfatos electrónicos para la aplicación en muchos campos tanto de la industria alimenticia, la gastronómica, aplicación en cuanto a la discriminación de aceites aromáticos, alcoholes y enfermedades utilizando el aliento de las personas muchas más aplicaciones, que se verán reflejados a continuación en la información aquí plasmada, en comparación al proyecto en mención no se tiene un dispositivo capaz de discriminar y caracterizar los gases presentes dentro del aceite de los transformadores, y si nos vamos en cuanto a costos que conlleva la parada como tal de estos equipos se podría dar con este proyecto una ayuda tanto económica y también desde la parte de monitoreo mantenimiento para la prevención y corrección de fallas internas del mismo.

En la Universidad Nacional de Colombia se desarrolló un prototipo de nariz electrónica para la discriminación de alcoholes de manera sencilla y económica en comparación con las narices electrónicas tradicionales, basada en cuatro sensores de gas, un sistema neumático irregular un hardware y un software para adquisición de datos y un software de reconocimiento de patrones, Se evaluó el comportamiento de la nariz y las condiciones de trabajo con muestras de vapor de alcoholes metanol, etanol, butanol y octanol, donde se ve reflejado un proceso sencillo en cuanto a la adquisición y análisis de los datos. (Paredes-doig et al., n.d.)

Otro de los proyectos de gran relevancia que se encontraron con respecto al desempeño de las narices electrónicas en todos los procesos industriales y hasta médicos se puede dar como ejemplo la aplicación de este dispositivo para la detección del cáncer gástrico proyecto desarrollado por parte de un estudiante y egresado de la universidad de pamplona, este estudio consiste en un método alternativo no invasivo para detectar el cáncer gástrico a partir del concepto de un sistema de olfato electrónico, el cual comprende de una matriz de sensores de gases basados en nanopartículas de oro y técnicas de reconocimiento de patrones que permiten identificar a través del aliento exhalado de las personas, un patrón de COVs relacionados con este tipo de cáncer. La evolución de nuevas tecnologías ha propiciado el desarrollo de dispositivos avanzados, por lo que el estudio de análisis del aire se ha convertido en un importante método de diagnóstico. En estudios recientes se ha demostrado que los biomarcadores derivados de la respiración pueden proporcionar más seguridad, mayor sensibilidad y especificidad que los métodos tradicionales (ej: GC-MS), arriesgándonos a decir que se podría catalogar como un método novedoso de diagnóstico no invasivo con entrega de resultados inmediatos, siendo una alternativa de gran interés para la detección de enfermedades. podemos observar aplicaciones de estos mismos dispositivos en la industria agroalimentaria, los sistemas de nariz electrónica se diseñaron para ser usados con numerosos productos y aplicaciones, como alimentos, empaques, cosméticos, control de calidad de materias primas y productos elaborados; monitoreo de procesos, frescura y madurez, investigaciones de estimación del tiempo de vida útil, valoraciones

de autenticidad de productos, clasificación de esencias y perfumes, detección de microorganismos patógenos y estudios medioambientales. Los análisis de rutina en control de calidad de alimentos constituyen una de las aplicaciones más promisorias de la nariz electrónica (**Electrónica & Novedosa, 2011**).

Se desarrolló una nariz electrónica para el monitoreo no destructivo del proceso de maduración del tomate de árbol (*Cyphomandra betacea* Sendt). Una matriz de 16 sensores de gases químicos fue acondicionada para la detección de tres índices de madurez del tomate de árbol (verde, maduro y sobre maduro). Una red neuronal probabilística (PNN) fue acoplada a una técnica de selección de variables (Recocido Simulado) para mejorar el resultado y la técnica PCA (análisis de componentes principales) fue aplicada para discriminar cada uno de los compuestos volátiles. Se analizó cierto número de medidas con las pruebas físico químicas con el objetivo de evaluar las propiedades físicas, químicas y sensoriales (es decir, pH, acidez y grados Brix) del producto y luego se compararon con los resultados de la nariz electrónica. El sistema olfativo fue capaz de una exactitud muy alta, para alcanzar un porcentaje de acierto de 99.886% (**Sendt & Manuel, 2014**).

Por parte de la universidad de España se quiere realizar el análisis de aceites y así discriminar por medio de los volátiles el tipo de aceite y luego proceder a realizar una clasificación del mismo, consiste en un sistema de acondicionamiento y captación de volátiles comercial (un Headspace Autosampler) y una cámara de medida que contendrá la agrupación de sensores de óxidos metálicos. La señal de dichos sensores será acondicionada y procesada mediante técnicas de análisis de componentes principales (PCA) y redes neuronales artificiales (ANN) capaces de identificar la muestra medida. Dentro de este objetivo un tema importante será analizar la deriva mediante calibraciones de los sensores. Si realmente se confirma la identificación de huellas olfativas características de cada tipo de aceite, las posibilidades de transferencia del equipo al sector comercial son elevadas ya que las ventajas que presenta la utilización de una nariz electrónica son entre otras, el bajo coste, sencillez de manejo y la posibilidad de valorar el aroma de un conjunto de volátiles en tiempo real (**Bosch & Lecha, 2001**).

Otra tesis doctoral que se pudo localizar enfocada al análisis de aceites y demás elementos que requieren control de calidad, esta se enfoca al análisis de gases y vapores, "Fabricación y puesta a punto de una Nariz Electrónica Húmeda para la detección de gases y vapores". Se fundamenta en el desarrollo de un sistema sensor de gases y vapores, basado en la técnica de voltimetría, para medidas sobre electrodos metálicos de muestras complejas en ambiente de humedad. Este tipo de sistema sensor se clasifica como una nariz electrónica, que puede definirse como un instrumento que integra un conjunto de sensores químicos no específicos y un sistema de análisis estadístico para el reconocimiento de patrones. La no especificidad de los sensores posibilita la medida de muestras cuyos elementos puedan presentar interferencias entre sí. El diseño de esta nariz electrónica húmeda nace con el objetivo de resolver la problemática de interferencia que los sensores basados en óxidos metálicos (extensamente utilizados en narices electrónicas) presentan a la presencia del agua (*No Title, n.d.*).

Se conoció la elaboración de un robot capaz de detectar sustancias alucinógenas en ambientes controlados, Desarrollar algoritmos de localización basado en redes neuronales para la detección de olores sobre un robot autónomo que sea capaz de detectar la intensidad de una sustancia en un ambiente controlado, Este sistema robótico será utilizado en un ambiente controlado y el algoritmo de localización se ejecutará sobre un ordenador el cual proporcionará los recursos necesarios para el procesamiento. La información de los sensores a su vez deberá ser proyectada sobre un modelo de redes neuronales el cual indicará la existencia o no de la fuente de olor (Titulación et al., 2017).

## **2.2.1 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS**

El propósito de este análisis es conocer exactamente las diferentes sustancias que componen los gases disueltos en el aceite extraído del transformador. Para ello se utiliza el medidor portátil de gases disueltos "Transport X". De acuerdo a la naturaleza de los gases disueltos en el aceite aislante, se puede determinar la causa de la anomalía y solucionarla antes que se convierta en una falla.

Cuando el transformador se somete a esfuerzos térmicos y eléctricos anormales, debido a la degradación del aceite y de los materiales aislantes, se generan ciertos gases combustibles. El tipo y las concentraciones de gases generados son importantes, por cuanto el proceso de envejecimiento normal produce cantidades extremadamente pequeñas de gases, mientras que condiciones incipientes o fallas declaradas generan cantidades grandes. Los gases típicos generados por algunas fallas incipientes en transformadores de fuerza son: Hidrógeno (H<sub>2</sub>), Oxígeno (O<sub>2</sub>), Nitrógeno (N<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>) Monóxido de carbono (CO), Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) y Acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) [4]. El Hidrógeno, Metano, Monóxido de carbono, Etano, Etileno y Acetileno son gases combustibles. Cuando se detectan gases en cantidad suficiente como para suponer la existencia de una falla, es necesario conocer la severidad de ella, lo cual se determina en base a la tasa de crecimiento por día de cada gas en particular, o del total de gases combustibles disueltos en el aceite.

Los mecanismos de falla más comunes son: Arcos eléctricos en el aceite y en el aislamiento sólido; Corona, Descargas eléctricas de baja energía en el aislamiento sólido y Sobrecalentamiento general o puntos calientes.

Existen dos maneras de representar los resultados de gases disueltos: A partir de las concentraciones individuales y por las relaciones entre gases.

### **2.2.1.1 Acetileno**

La presencia del acetileno en los gases disueltos en el aceite siempre se debe a una falla eléctrica. Si el acetileno está acompañado solamente de CH<sub>4</sub> y de H<sub>2</sub>, se trata de arco eléctrico de duración limitada en el aceite. Si estos elementos son acompañados de CO y CO<sub>2</sub>, este arco eléctrico implica o compromete el aislamiento sólido. Si esos mismos elementos (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>) sin CO ni CO<sub>2</sub> son acompañados de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, significa que existen descargas parciales fuertes o arcos eléctricos en el aceite.

Si, además se observa CO, significa que las descargas se producen en un aislamiento sólido.

#### **2.2.1.2 Etileno**

Si los productos de degradación contienen C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (sin C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) se trata siempre de una degradación térmica. Si no hay CO<sub>2</sub>, en el punto caliente no interviene el aislamiento sólido. La temperatura de esta falla será superior o inferior a 500°C, según sea mayor la cantidad de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> o de CH<sub>4</sub> respectivamente, entre los productos detectados. En general están acompañados de H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. Cuando, además de estos compuestos (H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), se constata la presencia de CO<sub>2</sub>, y eventualmente de CO, la falla consiste en un punto caliente de temperatura igual o superior a 130°C. Mientras no se alcance 300°C la relación CO/CO<sub>2</sub> permanece en el orden de 0,1.

#### **2.2.1.3 Dióxido de Carbono**

En ausencia de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> y del C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, el CO<sub>2</sub>, solo acompañado de un poco de CO o de CH<sub>4</sub>, es característico de un envejecimiento térmico normal del papel. Cuando predomina el H<sub>2</sub> y los hidrocarburos saturados, tales como C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, con una relación CO/CO<sub>2</sub> superior a 0,1, se trata de la existencia de pequeñas descargas parciales en el aislamiento sólido.

#### **2.2.1.4 Hidrógeno**

La presencia de H<sub>2</sub>, solo acompañado eventualmente de una cantidad de CH<sub>4</sub> se debe a descargas parciales, ya sea en el aislamiento, en la superficie libre de aceite, o bien, es la primera manifestación de una falla eléctrica más grave.

#### **2.2.1.5 Compuestos del aire (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)**

En el caso de fallas en el relé bucholz o de gas, puede ser que el gas extraído de este contenga O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. Si la proporción O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> es similar a la del aire, se puede tratar de una entrada de aire. Si la proporción de O<sub>2</sub> es mucho menor que la del aire, esto puede deberse a un punto caliente de temperatura superior a 100°C (**Sánchez, 2015**).

Una vez vistos los anteriores proyectos, quisimos enfocarnos en la parte que nos corresponde como es el análisis del aceite de los transformadores, las preguntas que surgieron fue saber cómo se desarrolla este proceso dentro de la empresa que prestan el servicio de energía en el departamento de Norte de Santander – Colombia, la cual nos permitió acceder al proceso de cromatografía ya que se cuenta con un laboratorio específicamente para realizar este tipo de procesos.

# CAPITULO 3

### 3. NARIZ ELECTRONICA

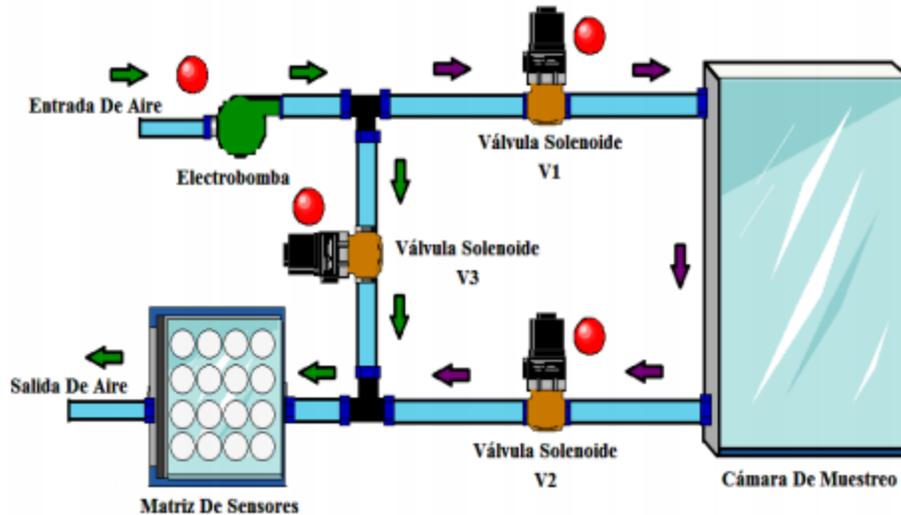
Los sistemas multisensoriales son una investigación que data ya de aproximadamente 30 años pero que ha tenido un gran auge en los últimos años desarrollando nuevos productos y encontrando aplicaciones que en otro momento no sería posible realizarlas. Un sistema multisensorial está basado en sensores, los cuales pueden intentar imitar el comportamiento de los sentidos en el ser humano, el olfato y el gusto. Durante los años 80 los investigadores se centraron en una maquina olfativa que sería llamada nariz electrónica, un instrumento compuesto de un arreglo de sensores que permitían reconocer algunos olores o compuestos físico, una gran variedad de sensores ha sido desarrollada teniendo como base 3 materiales muy usados, metal-oxido, polímeros y sensores enzimáticos. Estos sistemas constantemente se están comparando con los espectrómetros o cromatógrafos, como en estos instrumentos una vez que se adquiere la información que podemos denominar data, esta es analizada y procesada por diferentes técnicas:

- Análisis de componentes principales
- PLS
- Análisis de discriminación funcional
- Análisis de clúster
- Lógica difusa
- Redes neuronales

Desde 1993 se han publicado aproximadamente 12000 artículos de las aplicaciones de las narices electrónicas en la industria alimenticia, los trabajos realizados tienen que ver con el pescado, la carne, la leche, el vino, café y té, donde las investigaciones buscan en muchos momentos determinar variedades de alimentos, frescura, adulteración, olor y detección de bacterias uno de los procesos más complejos existentes. El aceite de los transformadores está compuesto normalmente por sustancias químicas donde este tipo de elementos pueden ser detectados por varios tipos de sensores, químicos, resistivos, inductivos, dando como resultado una o varias señales que permiten por medio de técnicas de procesamiento encontrar patrones o comportamientos que puedan identificar ciertos tipos de sustancias presentes en el aceite en su proceso de funcionalidad **(Eduardo et al., 2016)**.

En términos generales la nariz electrónica es un dispositivo compuesto por cuatro etapas funcionales.

- Concentración de los volátiles
- Captura de los volátiles
- Electrónica de control
- Procesamiento de la información



**Figura 13 Esquema de la E-nose** (Eduardo et al., 2016)

En la siguiente parte se explica el funcionamiento del sistema el cual está basado en la generación y control de un flujo de aire que dirige los volátiles desde la cámara de concentración hacia la de medida como es ilustrado en la figura 15 por medio de las flechas de color violeta. Por este motivo, el sistema de muestreo consta de las tradicionales cámaras de concentración y medida más cuatro electroválvulas y una bomba de aire.

El procedimiento de medida en el módulo consta de tres fases bien diferenciadas: La fase de concentración, la fase de medida y la fase de reposo. En todas ellas el flujo de aire que atraviesa la cámara de medida (donde están ubicados los sensores) permanece constante. La figura 15 muestra un esquema del módulo de muestreo en el que se pueden distinguir claramente los diferentes caminos que sigue el flujo de aire en cada una de las fases. Cuando el sistema se encuentra en la fase de concentración, la bomba toma el aire del laboratorio y las electroválvulas lo conducen a través de la cámara de medida.

El flujo de aire abandona el sistema y es devuelto al exterior sin circular a través de la cámara de concentración, ya que las electroválvulas han cerrado dicho camino con la finalidad de que se acumulen volátiles en su interior, esto se observa en la figura 15 siguiendo las flechas verdes. Esta fase puede durar unos 15 a 30 minutos, tiempo suficiente para acumular una gran concentración de volátiles y así obtener una buena señal de los sensores. Durante la fase de medida, la bomba de aire empuja los volátiles a través de un circuito cerrado desde la cámara de concentración a las de medida. Durante dicha etapa el aire del exterior circula a través de la cámara de muestreo y por la de medida la cual contiene la matriz de sensores terminando de esta manera el recorrido saliendo expulsados fuera del circuito y del laboratorio esto se muestra mediante flechas violetas en la figura 15.

Para esta fase un tiempo total de 10 minutos es considerado adecuado, ya que este intervalo de tiempo permite que los sensores alcancen un valor estable. Cuando la

medida ha finalizado, el sistema pasa a la fase de limpieza y reposo. En esta etapa se pretende limpiar todo el circuito de medida y restablecer la respuesta de los sensores a su resistencia de reposo. El aire es tomado del laboratorio, circula en primer lugar a través de las cámaras de medida, seguidamente pasa al exterior, y empuja los volátiles que hayan podido quedar fuera del circuito. Una duración apropiada para esta fase puede ser de 15 a 20 minutos dependiendo del volátil y del número de muestras a tomar.

Los grandes avances en los campos de la electrónica, bioquímica, inteligencia artificial y tecnología sensoria han creado un camino para implementar la nariz electrónica como un gran instrumento. Esto permite aplicar los conocimientos en áreas como la agricultura, la industria cosmética, desarrollo ambiental, transporte aéreo, investigación, etc. **(Eduardo et al., 2016).**

### **3.1. SENSORES**

En el diseño o elaboración de los biosensores y la optimización de su desempeño puede mejorarse usando sistemas mono-enzimáticos basados en el hidrólisis del acetileno. En este caso la detección es basada en la oxidación de la tiocolina producida en un electrodo de platino, usando como aproximación que las potencias aplicadas son tan bajas que permite monitorear la oxidación del peróxido de hidrógeno. Podemos encontrar también los micro sensores de polímero, cuyas propiedades físicas y eléctricas son alteradas en presencia de ciertos volátiles, un arreglo de estos sensores podría detectar fácilmente por cambios en la conductancia diferentes tipos de componentes además de que en sus ventajas podemos enumerar que pueden operar en temperatura ambiente, son muy estables, su rango de aplicación es bastante alto y posee también una alta sensibilidad. También aparecen los sensores de metal-óxido (MOS), ellos están basados en elementos semiconductores que muestran un cambio de resistividad al exponerse a ciertos compuestos, las ventajas de estos sensores es que tienen una baja respuesta a los cambios de humedad, un periodo muy largo de actividad sin daño y un gran rango de aplicaciones. Se analizan también para este proyecto cuya investigación se centra en la posibilidad de detectar pesticidas en una nariz electrónica los sensores BAW (bulbo de onda acústica), son dispositivos piezoeléctricos basados en cristales osciladores unidos con diferentes materiales que permitan analizar los cambios de la frecuencia en presencia de diversos componentes, son capaces de manejar diferentes tipos de volátiles, estables en cambios de temperatura y baja sensibilidad a cambios de humedad. De estos tipos de sensores los más usados en los sistemas multisensoriales son los MOS y los CP, cada fabricante crea sensores de diferentes tipos, y la elección se realiza dependiendo del tipo de muestra que se vaya a analizar.

SENSORES DE LA E-NOSE 2.0		
REFERENCIA SENSOR	USO ESPECIFICO	FABRICANTE
TGS-821	Hidrogeno	FIGARO
TGS-813	Gases Combustibles	FIGARO
TGS-832	CFC	FIGARO
TGS-825	Sulfato de hidrogeno	FIGARO
TGS-880	Olores de comida	FIGARO
TGS-822	Vapores orgánicos	FIGARO
TGS-800	Contaminantes del aire	FIGARO

**Tabla 2** Sensores de la e-nose

En la tabla 5 se muestran a detalle los sensores que componen la cámara de adquisición de datos del sistema multisensorial embebido, cada uno de ellos se encarga de identificar los diferentes gases presentes en el aceite de los transformadores, teniendo en cuenta que allí no se describe que tipo de gas compone cada uno de los usos a los cuales se dará aplicación a los respectivos sensores, se realizó un estudio a detalle donde se conocen cada una de las características de la referencia de los sensores mencionados en la tabla 5, para dar certeza de que los sensores allí presentes se podrían asociar al trabajo que se viene realizando con los gases presentes en el aceite, donde ya anteriormente se mencionó lo gases que ocasionan daño en dicho dispositivo y así poder aplicar el respectivo procedimiento para el mantenimiento o reparación.

En cuanto al sensor mencionado en la tabla 5 con referencia **TGS-813**, los sensores de gas de combustión de Fígaro que utiliza tecnología de semiconductor de dióxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ) ofrece una concentración de proporción a gas de salida. Estos sensores de bajo coste pueden detectar una amplia gama de gases de combustión, lo que los convierte en ideales para una amplia variedad de aplicaciones, capaz de resistir temperaturas de hasta  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Las aplicaciones típicas incluyen detectores de fugas de gas domésticos y alarmas, así como detectores de gas portátiles, alta sensibilidad al metano, propano y butano, donde estos gases especifica el cual tiene alta sensibilidad son unos de los cuales componen unos de los de gases presentes en el aceite, el siguiente sensor a caracterizar es el Fígaro **TGS-800** Tipo de sensor de gas Monóxido de carbono, metano, isobutano, hidrógeno, etanol, los cuales sirven para caracterizar la calidad del aire.

### 3.2. CIRCUITO NEUMÁTICO

Este circuito neumático utiliza 3 electroválvulas, con la EV1 y EV2, generamos un cierre completamente hermético en la cámara de concentración, buscando que los volátiles no se escapen y queden todos retenidos en ese espacio, con la EV3 controlo el flujo de aire directo a la cámara de sensores que me permite realizar limpieza y recuperación de los sensores, una vez que termina el tiempo de concentración activo las dos electroválvulas permitiendo a la bomba de aire trasladar los volátiles desde la cámara de concentración

hasta la cámara de los sensores. En este proyecto se utilizó electroválvulas de 110VA, con una rosca de  $\frac{1}{4}$  de pulgada y acoplada con racor número 6, el más pequeño para manejar un diámetro de manguera reducido y tener una presión suficiente para el desplazamiento de las muestras y poder realizar una limpieza rápida y adecuada de los sensores MOS.



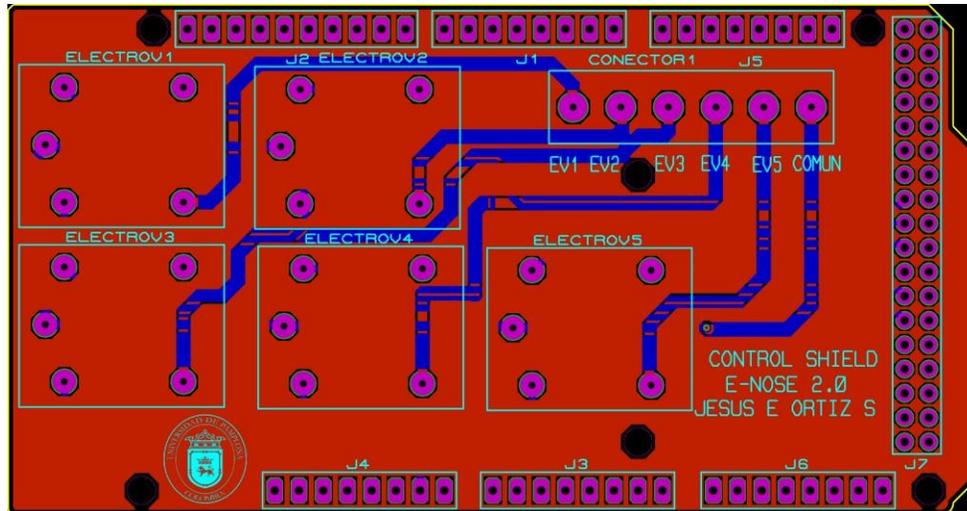
**Figura 14 Electrovalvula 110V 1/4 de rosca**

Al tener este tipo de elementos que trabajan con AC se hace necesario el diseño y construcción de un circuito que se acople a la parte de control que es ejecutada por un microcontrolador y pueda realizar la correcta activación y desactivación de estos dispositivos.

Esta placa se diseña teniendo varias consideraciones:

- Corriente en las electroválvulas
- Ruido electromagnético
- Cantidad de elementos a controlar
- Tamaño de pista que pueda soportar gran cantidad de corriente
- Consumo del microcontrolador

Tomando estas indicaciones se diseña una placa tipo ESCUDO de Arduino el microcontrolador escogido para realizar el enlace entre el sistema DAQ y la parte de potencia y control del circuito neumático, la idea es disminuir el número de cables y tener una sincronización perfecta entre los elementos propios del circuito, el diseño se realiza en PROTEUS PROFESIONAL 8.3, en la figura 28 encontramos el diseño del PCB, aunque el circuito neumático solo utiliza 3 electroválvulas en el diseño se implementan 5 relevos, esto por si llega a existir algún daño de un canal no represente mayor conflicto el cambio de canal y seguir trabajando de la misma manera, estos relevos cuentan con un voltaje de activación de la bobina de 5V y una capacidad en sus comunes y conectores de hasta 250V con una corriente máxima de flujo de 10A.



**Figura 15** Diseño placa de electrónica de potencia con relés.

La elaboración del circuito siguiendo con los altos estándares que se llevan en este proyecto se encarga a la empresa COLCIRCUITOS ubicada en la ciudad de Medellín, pidiendo acabados de tipo profesional, con antisolder azul que combine con el Arduino Mega 2560 y leyenda de componentes blanca que haga resaltar la información de la tarjeta fácilmente, la duración de fabricación de este circuito es de 5 días hábiles.



**Figura 16** PCB control de circuito neumático

En la figura 16 observamos el circuito finalizado y ubicado ya sobre la tarjeta Arduino mega 2560 quien es la encargada de comunicarse con la DAQ y llevar el control del circuito neumático, además también se encarga de la visualización en la pantalla GTF que es una especie de interfaz hombre maquina donde el usuario del proyecto puede ir consultando el estado del proceso de adquisición de la muestra.

### 3.3. CÁMARA DE SENSORES

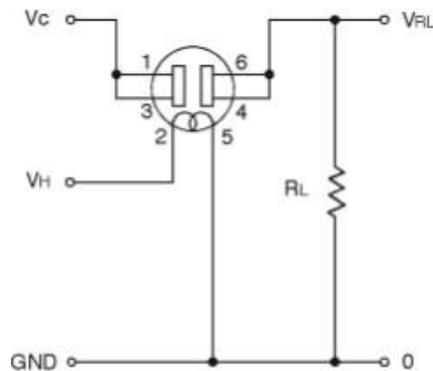
Los sensores elegidos son los mismos que están ubicados en el sistema original B\_nose, son sensores de la empresa fabricante FIGARO de tipo MOS, estos circuitos requieren de la implementación de un circuito para realizar el correcto funcionamiento y adquisición de los datos. En la figura 19 podemos identificar un sensor de gas tipo MOS del fabricante FIGARO, los sensores varían dependiendo de su aplicación, también dependiendo de la forma se ubican en una o varias familias de sensores, la idea de un olfato electrónico no es tener un número igual de sensores, un ejemplo 8 sensores solo de amoniaco, se pueden repetir un par de veces, pero la idea es que la mayoría sean diferentes para poder constituir una huella de volátiles que nos de muchas más herramientas para el momento de realizar el procesamiento de la información y tener resultados claros y concisos.



**Figura 17 Sensor de Hidrogeno FIGARO**

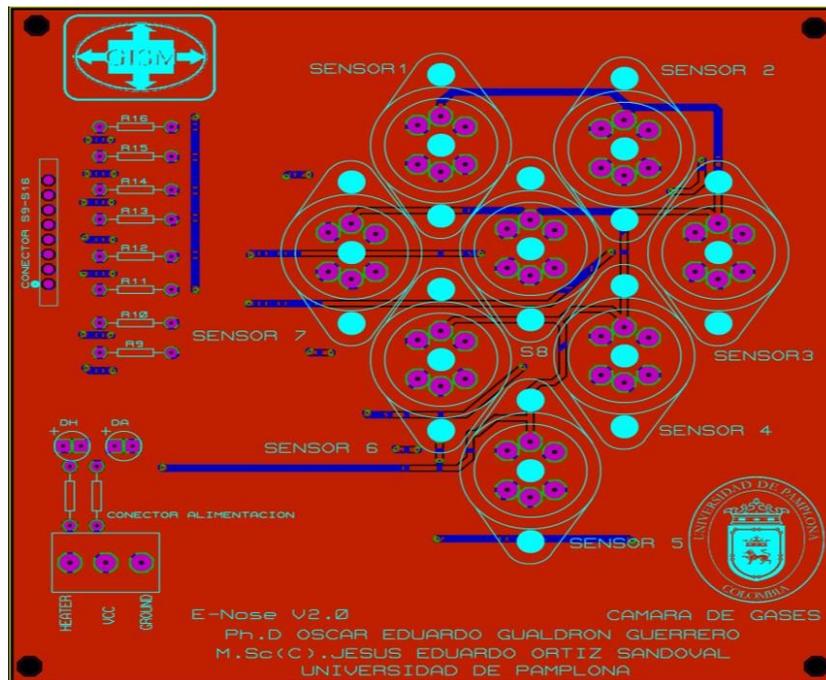
En la nariz electrónica original se encuentran 16 sensores, aunque por lo general hay dos sensores por cada referencia, por lo que en realidad solo están presentes 8 tipos de sensores, lo que deseamos en nuestro proyecto es solo tener 8 sensores.

En la figura 18 se encuentra el circuito de trabajo de los sensores MOS, ellos cuentan con un Heater, que es una especie de resistencia calefactora que eleva la temperatura de la superficie para que cuando se detecten volátiles cambie la resistencia y se produzcan cambios en el divisor de tensión diseñado junto con la resistencia de carga RL, estos sensores pueden ser alimentados por VC hasta máximo 25V, pero debido a nuestro sistema de adquisición de datos se alimentan los sensores con 10V.



**Figura 18 Circuito de sensor MOS**

Al igual que en la PCB de potencia, se realiza el diseño de una váquela doble capa con interconexión TRUE HOLD para la implementación del circuito de sensores, se ubican a mano derecha las 8 bases de los sensores y en la parte inferior se conecta una bornera donde debe ir conectada la alimentación del Heather, VCC y tierra o neutro.

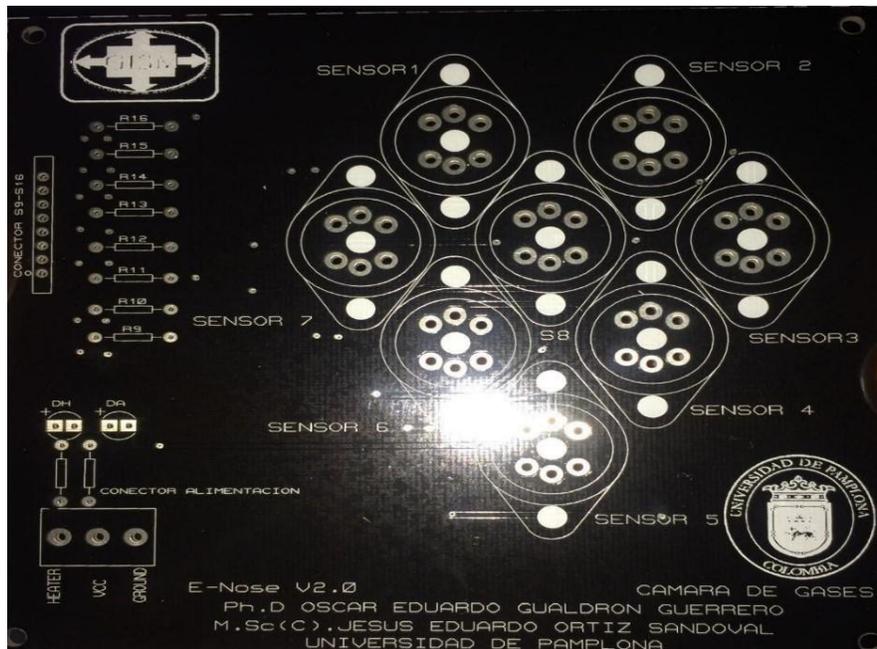


**Figura 19 Diseño circuito de sensores**

En la figura 19 vemos el diseño finalizado con la leyenda de componentes característica del proyecto y que sea de ayuda para el montaje del circuito, este también se envía a producción a la compañía COLCIRCUITOS, eligiendo el color de la máscara de soldadura negra con leyenda de componentes blanca para que tenga un contraste con

el diseño en colores del nuevo instrumento.

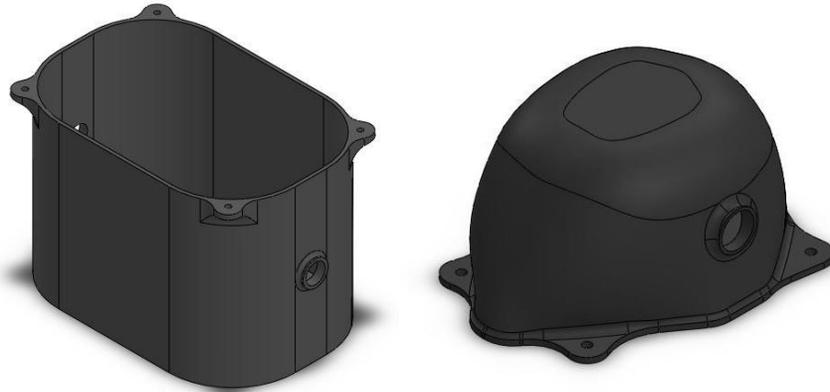
Se puede observar la váquela lista en la figura 22, acabados profesionales interconexión por hueco deslizante entre las dos capas y pads de soldado superiores e inferiores para facilitar el trabajo.



**Figura 20 PCB de sensores**

### 3.3.1. DISEÑO ELEMENTOS EN 3D

Una de las necesidades primordiales en la nariz electrónica es tener compartimientos completamente herméticos, esto asegura poder adquirir señales totalmente limpias en cada una de las muestras contenidas dentro de la cámara de gases. En el proyecto anterior las dos cámaras mencionadas se realizaron en acrílico y se les aplicó silicona líquida para crear como un tipo de vacío parcial, aunque con el paso del tiempo esta sustancia va cediendo y puede que se empiecen a crear pequeños agujeros por donde pueden entrar volátiles del exterior.



**Figura 21** Diseño en SolidWorks de la cámara de sensores y cámara de concentración.

### 3.3.2. Arquitectura física E-nose 2.0

Se requiere diseñar e implementar la arquitectura física de la nariz, aunque se parte de la E-nose de la Universidad se quiere mejorar el diseño anterior, primero comenzando por el material con el que se implementara, la primera idea es hacerlo en impresión 3D para tener un poco más de curvas y libertad de diseño.

## 3.4. ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL



**Figura 22** Arduino MEGA

Para realizar el control de todos los componentes de la nariz electrónica se debe utilizar un microcontrolador, tomando como base la tendencia mundial de open source, una opción barata, rápida y que puede prestar buenas prestaciones es la Arduino MEGA presente en la figura 22 este dispositivo a pesar de ser un microcontrolador de gama baja tiene las prestaciones necesarias para el funcionamiento del proyecto, pues los requerimientos no son muy altos, debe encargarse del control del circuito de potencia, y como complemento manipular la interfaz gráfica que es una LCD GTFT diseñada

especialmente para Arduino.

Otra ventaja de este dispositivo es que tiene embebido su programador a diferencia de un ejemplo los microcontroladores Microchip que es el que tiene la antigua nariz electrónica, si en algún caso que puede suceder se borra el firmware del sistema en la E-nose primera versión se hacía necesario desarmar por completo el sistema, buscar un programador y volver a programar él .HEX, en este caso si la misma situación aconteciera la tarjeta tiene un puerto USB que queda accesible desde donde se podría reprogramar en cuestión de segundos, además se podrían hacer cambios en la visualización que serían fácilmente adaptables, esto da como resultado un mantenimiento más sencillo y un rendimiento personalizado y que lleva al máximo las prestaciones del dispositivo.

Además como si fuera poco este dispositivo se puede acoplar con software como Matlab y Labview, además que tiene 16 entradas analógicas, si se quisiera se podría conectar la cámara directamente a la placa y realizar mediante ella la adquisición de los datos, o buscando una actualización de este dispositivo se puede acoplar con un escudo Wifi, o GSM el cual lo que podría hacer sería adquirir la información directamente de la cámara de los sensores y luego transmitir los datos desde un ejemplo una mina, una finca, una empresa hasta el lugar donde se realiza el procesamiento de los datos, esto sería una comunicación semidúplex y este microcontrolador nos da las herramientas para lograrlo, estas razones además de su fácil alimentación y bajo consumo energético fueron los motivos para elegirlo como el encargado de realizar el control del dispositivo.

Su funcionamiento es relativamente sencillo, se declaran como entradas los pines 22,23,24 y 25 que son conectados a la tarjeta de adquisición de datos, depende del estado de los cuatro bits él tiene 3 funciones preestablecidas, concentración, captura y reposo, en cualquiera de estas funciones se está modificando el estado de las salidas 33,36 y 38 que se conectan a la placa de potencia para realizar el control de las electroválvulas que son encendidos por flancos de bajada, por último utiliza comunicación SPI para acceder a una memoria SD donde se encuentran las imágenes que serán visualizadas en la pantalla y donde además se pueden almacenar datos como reportes de uso, y si se desea el valor de los sensores.

### **3.5. DAQ 6009**

Por razones de precisión se elige una tarjeta de adquisición de datos de la empresa National Instruments cuya referencia es 6009 y puede ser observada en la figura 42, este dispositivo cuenta con 14 salidas/entradas digitales y 8 canales simples analógicos o 2 diferenciales, además su rango de trabajo es  $\pm 10V$  en adquisición simple o  $\pm 20V$  en adquisición diferencial, esta tarjeta cuenta con un componente DAQMX para Matlab donde facilita el uso de la adquisición de datos o manipulación de salidas, El USB-6009 brinda funcionalidad básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. El dispositivo tiene una cubierta

mecánica ligera y es energizado por bus para fácil portabilidad. Puede conectar fácilmente sensores y señales al USB-6009 con conectividad de terminal de tornillo.



**Figura 23 DAQ 6009**

### **3.6. HEAD SPACE SAMPLING**

El headspace sampling es una técnica del espacio de cabeza se puede adaptar para afrontar una variedad de procesos analíticos. Los compuestos volátiles en casi cualquier matriz de muestra se pueden determinar de manera simple y rápida mediante cromatografía de gases de espacio de cabeza, esta técnica se tiene en cuenta debido a que el procedimiento que se realiza para el análisis del aceite de los transformadores, con el fin de asemejar la herramienta que se quiere construir con la cromatografía de gases.

Esta técnica implica la recogida de muestras en un vial que se sella herméticamente. Los componentes volátiles se difunden en la fase gaseosa hasta que se alcanza un estado de equilibrio. Este proceso se puede facilitar mediante el calentamiento y la agitación del vial. Luego, la muestra se toma del espacio de cabeza para su respectivo análisis y proporcionar una extracción sin solventes de compuestos volátiles de muestras líquidas y sólidas, elimina los pasos que requieren mucho tiempo y producen errores, aplicados en otras técnicas de preparación de muestras, como purga y trampa o extracción con solvente.

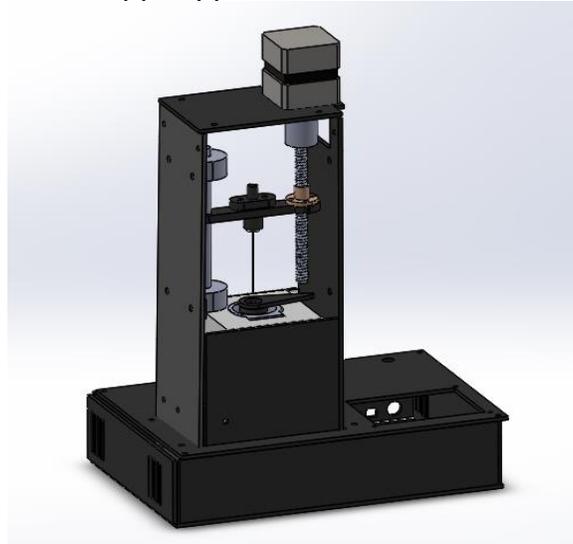
Las muestras se pueden sellar en viales con espacio de cabeza en el punto de recolección, lo que reduce las pérdidas de analito que pueden ocurrir con otras técnicas durante el manejo y almacenamiento de la muestra.

Para acoplar el sistema de muestreo en espacio de cabeza al sistema multisensorial embebido donde se hará la clasificación de cada una de las muestras, este dispositivo nació de la idea de tres jóvenes investigadores de la universidad de pamplona pertenecientes al grupo GISM (Grupo de Investigación en Sistemas Multisensoriales y Reconocimiento de Patrones) se decide diseñar y construir un prototipo que funciones de la misma forma que trabaja un sistema de espacio de cabeza, a continuación se

detalla cada uno de los aspectos que se tuvieron en cuenta para la elaboración del mismo.

### **3.6.1. DISEÑO EN SOLIDWOR DE LA MAQUETA**

En la figura 24 se ilustra el diseño de un headspace sampling “tipo estático” para la extracción de los VOC’S y posterior inyección a un Sistema de Percepción Multisensorial. En el muestreo de espacio de cabeza estático la muestra debe ser termostática y debe permitir alcanzar una situación de equilibrio. La muestra del espacio de cabeza es más pequeña en comparación con el volumen total del espacio de cabeza, se determinan concentraciones en el intervalo ppm-ppb o aún menores.



**Figura 24 Vista frontal STATIC HEADSPACE SAMPLING**

### **3.6.2. FUNCIONAMIENTO DEL HEADSPACE SAMPLING**

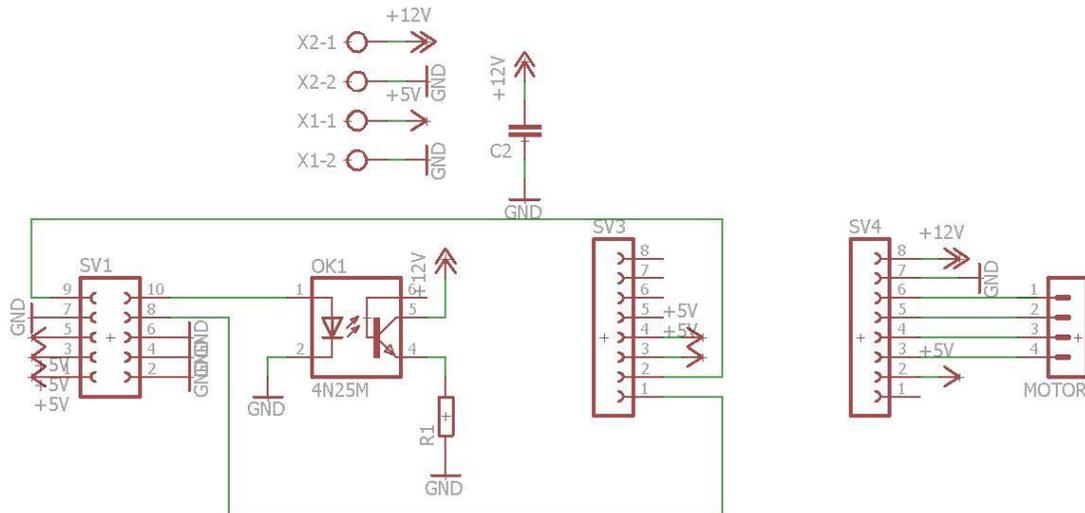
En la figura 25 se observa cada uno los elementos que se emplearon para fabricar el acoplamiento del sistema de calentamiento donde se puede observar que la resistencia se tuvo que aislar con un material de yeso el cual es resistente a altas temperaturas por su procesamiento como material de exteriores y demás fines, para la medición y monitoreo de la temperatura interna de la resistencia se acoplo una termocupla tipo k es un sensor de temperatura, es el más utilizado industrialmente. También se le dice termopar, es un “transductor”, se crea con dos alambres de diferentes materiales unidos cada uno en un extremo (se recomienda que deben estar soldados), al unirlos produce una diferencia de potencial o señal eléctrica, también llamado el efecto Seebeck, del orden de los milivoltios, aumentando con la temperatura, uno de los extremos se le llama punto caliente y al otro extremo se le llama punto frío.

La termocupla tipo K cuenta con una diversidad de usos, es generalmente usado por su resistencia a la oxidación. También cuenta con el material cromel (Combinación del Cromo y Aluminio) que tiene una alineación de Ni-Cr y el alumel (Combinación del Aluminio y Nickel) con una alineación de Ni-Al, su rango de temperatura varía de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $+1372^{\circ}\text{C}$ , por las características y el rango de funcionamiento de la misma se toma

este tipo de dispositivo para ser acoplado al sistema de calentamiento (**Arian Control & Instrumentation, 2013**).

### 3.6.3. DISEÑO DE LA VAQUELA PARA EL CONTROLADOR DEL MOTOR PASO A PASO (NEMA 17)

Se realizó el diseño de una váquela para implementar el controlador del motor paso a paso nema17, este motor cuenta con un dispositivo para su debido control al cual se le debe diseñar un controlador en váquela que se acople al mismo a para su correcto funcionamiento, luego de realizada la váquela correspondiente al controlador del motor paso a paso e implementada dentro de la maqueta se debe realizar el código de programación para darle ordenes al motor paso a paso de la función a realizar.



**Figura 25** Diseño del controlador del motor paso a paso

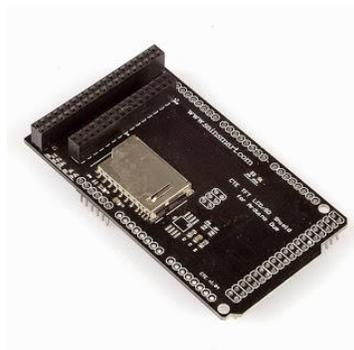
### 3.6.4. PANTALLA TFT320QVT:

La pantalla TFT 320 QVT es un display LCD TFT gráfico ( GLCD ) con interfaz táctil ( Touch Screen ), y conector para tarjetas SD. Lo que necesitamos saber de esta pantalla son sus características y como conectarla a nuestra placa Arduino Due, a partir de aquí es conveniente utilizar las librerías de Henning karlsen donde se encuentran varios ejemplos para aprender como interactuar con la pantalla. Para interactuar con nuestra placa y Touch Screen de la pantalla necesitamos la librería UTouch , la configuración de esta librería es la misma tanto si utilizas el shield CTE TFT LCD/SD, como si cableas la pantalla directamente a la placa Arduino DUE, debemos declarar en nuestro IDE los pines de conexión tal y como se muestra en la siguiente imagen.



**Figura 26 Pantalla LCD**

### **3.6.5. EL SHIELD CTE TFT LCD/SD:**



**Figura 27 El shield cte tft LCD/SD**

Simplifica mucho la conexión entre la placa Arduino Due y la pantalla TFT 320QVT, no es un dispositivo necesario, la pantalla TFT se puede conectar a la placa de Arduino Due mediante cableado, solo hay que seguir el conexionado que dejo al final de este comentario, pero incorporar este shield te permite dejar todo recogido en un solo bloque, facilita el manejo a la hora de interactuar con la pantalla y la placa, además este shield es compatible con versiones LCD de 40-pin y con versiones LCD de 32-pin, igual que la pantalla TFT 320QVT también incorpora una ranura para tarjetas SD.

## **3.7. DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIGITAL PID EN UN MICROCONTROLADOR**

Para el diseño del controlador PID digital se tuvo en cuenta la curva de reacción, el cálculo de las constantes del control PID empleando la técnica de Ziegler-Nichols que consiste en ajustar o "sintonizar" un controlador PID de forma empírica, sin necesidad de conocer las ecuaciones de la planta o del sistema controlado. Estas reglas de ajuste propuestas por Ziegler y Nichols fueron publicadas en 1942 y desde entonces es uno de los métodos de sintonización más ampliamente difundido y utilizado. Los valores propuestos por este método intentan conseguir en el sistema realimentado una respuesta al escalón con un sobre El método de Ziegler-Nichols permite ajustar o "sintonizar" un controlador PID de forma empírica, sin necesidad de conocer las ecuaciones de la planta o del sistema controlado. Estas reglas de ajuste propuestas por Ziegler y Nichols fueron publicadas en 1942 y desde entonces es uno de los métodos de sintonización más

ampliamente difundido y utilizado. Los valores propuestos por este método intentan conseguir en el sistema realimentado una respuesta al escalón con un sobreimpulso máximo del 25%, que es un valor robusto con buenas características de rapidez y estabilidad para la mayoría de los sistemas.

El método de sintonización de reguladores PID de Ziegler-Nichols permite definir las ganancias proporcional, integral y derivativa a partir de la respuesta del sistema en lazo abierto o a partir de la respuesta del sistema en lazo cerrado. Cada uno de los dos ensayos se ajusta mejor a un tipo de sistema. pulso máximo del 25%, que es un valor robusto con buenas características de rapidez y estabilidad para la mayoría de los sistemas.

El método de sintonización de reguladores PID de Ziegler-Nichols permite definir las ganancias proporcional, integral y derivativa a partir de la respuesta del sistema en lazo abierto o a partir de la respuesta del sistema en lazo cerrado. Cada uno de los dos ensayos se ajusta mejor a un tipo de sistema. La implementación se hace a través de leguaje de alto nivel que facilita la puesta en marcha del controlador.

### 3.7.1. TOMA DE DATA:

En la **tabla 6** se describe la toma de los datos incrementando el duty en proporción de 10 hasta el máximo valor, tomando registro de la temperatura medida en la resistencia y del valor de tensión en la resistencia calefactora para así tener un dato exacto del funcionamiento de dicho controlador.

En la tabla antes mencionada se visualiza el comportamiento de la termocupla con respecto al incremento de temperatura y también la conducta del controlador con respecto de la misma, se toma la data y se aplica el método ensayo error con el fin de poder obtener el valor exacto de cada una de las variables del controlador.

En base a los datos adquiridos por medio de las pruebas realizadas se realiza una regresión lineal que consiste en una técnica de modelado estadístico que se emplea para describir una variable de respuesta continua como una función de una o varias variables predictoras. Puede ayudar a comprender y predecir el comportamiento de sistemas complejos o a analizar datos experimentales, financieros y biológicos.

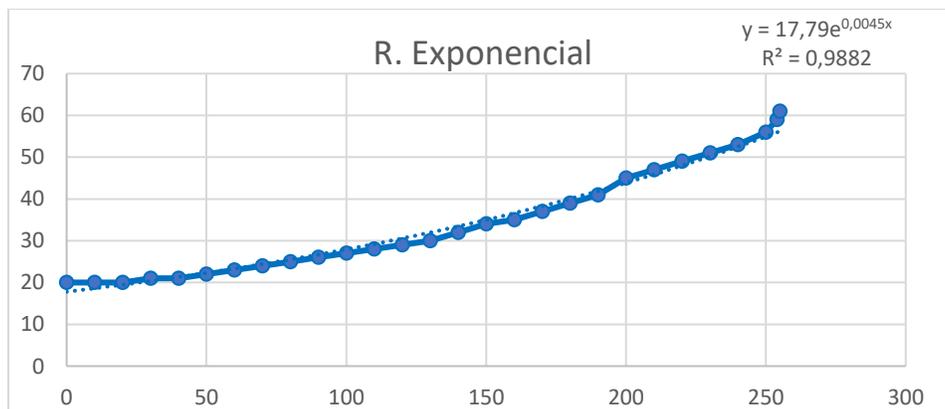
Las técnicas de regresión lineal permiten crear un modelo lineal. Este modelo describe la relación entre una variable dependiente y (también conocida como la respuesta) como una función de una o varias variables independientes  $X_i$  (denominadas predictores). La ecuación general correspondiente a un modelo de regresión lineal es:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \epsilon_i$$

donde  $\beta$  representa las estimaciones de parámetros lineales que se deben calcular y  $\epsilon$  representa los términos de error.

#	DUTY	VRL	TEMPERATURA
1	0	0.5	20
2	10	1.446	20
3	20	2.346	20
4	30	3.25	21
5	40	4.15	21
6	50	5.03	22
7	60	5.92	23
8	70	6.8	24
9	80	7.71	25
10	90	8.59	26
11	100	9.48	27
12	110	10.36	28
13	120	11.25	29
14	130	12.13	30
15	140	13.01	32
16	150	13.9	34
17	160	14.78	35
18	170	15.68	37
19	180	16.56	39
20	190	17.45	41
21	200	18.32	45
22	210	19.18	47
23	220	20.09	49
24	230	20.97	51
25	240	21.83	53
26	250	22.73	56
27	254	23.07	59
28	255	23.12	61

**TABLA 3 DATA DEL SISTEMA PARA EL DISEÑOR DEL CONTROLADOR**



**Figura 28 Grafica exponencial del sensor termopar tipo K**

En la figura 29 se puede observar la linealización exponencial que se realizó en base a la data obtenida del controlador diseñado para poder observar en forma gráfica la respuesta que este nos entrega y así poder tomar el mejor controlador posible.

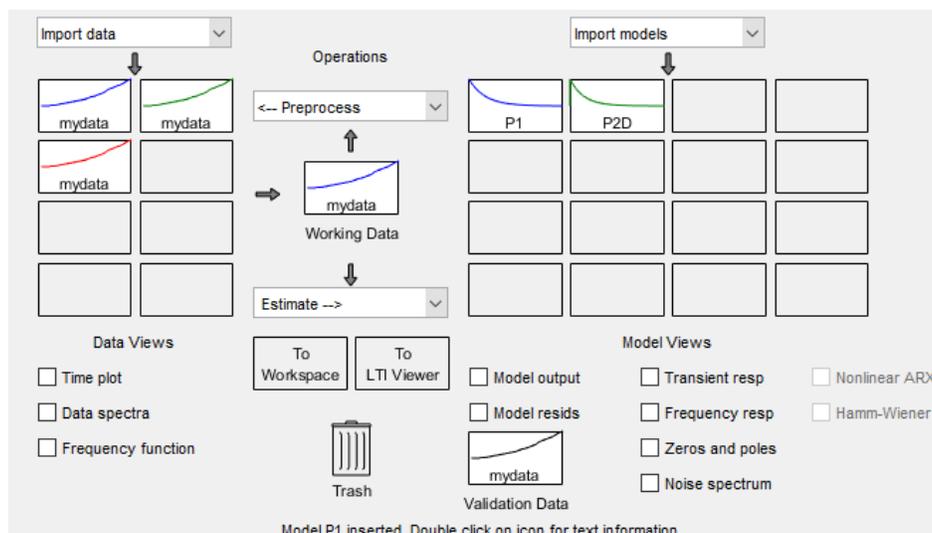
En base a la respuesta adquirida por medio de la data entregada por el sensor podremos determinar así las variables del  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  del controlador PID, por medio de la toolbox de Matlab que nos permite obtener la respuesta según la regresión lineal ya realizada.

### 3.7.2. IDENT System Identification Toolbox:

A través de esta toolbox de Matlab se pueden, crear modelos de sistemas dinámicos lineales y no lineales a partir de datos de entrada-salida medidos.

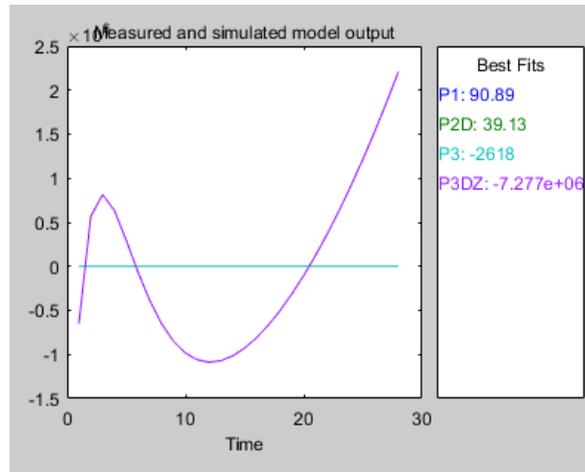
IDENT consiste crear y utilizar modelos de sistemas dinámicos que no se pueden modelar fácilmente a partir de los primeros principios o especificaciones. Puede utilizar datos de entrada-salida en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia para identificar funciones de transferencia de tiempo continuo y tiempo discreto, modelos de proceso y modelos de espacio de estado. La caja de herramientas también proporciona algoritmos para la estimación de parámetros en línea incorporada.

La caja de herramientas proporciona técnicas de identificación como máxima verosimilitud, minimización de errores de predicción (PEM) e identificación del sistema subespacial. Para representar la dinámica del sistema no lineal, puede estimar modelos de Hammerstein-Wiener y modelos ARX no lineales con no linealidades de red de ondículas, partición de árbol y red sigmoidea. La caja de herramientas realiza la identificación del sistema de caja gris para estimar los parámetros de un modelo definido por el usuario. Puede utilizar el modelo identificado para la predicción de la respuesta del sistema y el modelado de plantas en Simulink. La caja de herramientas también admite el modelado de datos de series de tiempo y el pronóstico de series de tiempo.

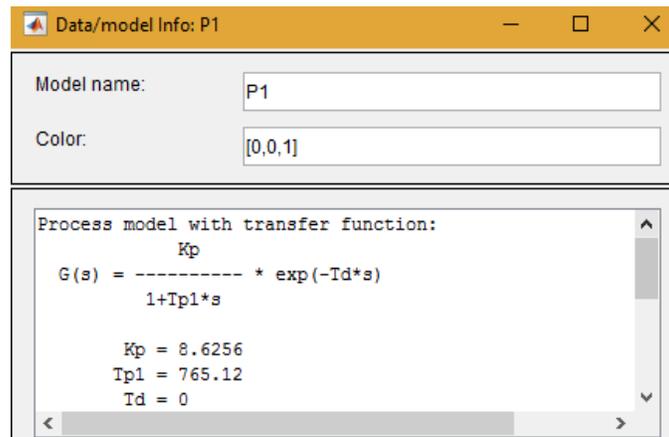


**Figura 29 TOLBOOX MATLAB IDENT**

En la **figura 30** se visualiza la implementación de la toolbox donde se insertan los datos y se compara cual señal es la más parecida en la salida para obtener la información y así hacer uso de la opción Model Output, y a partir de este se obtiene que el modelo P1 es el de mayor porcentaje de similitud a un sistema de un solo polo y así conseguir la data correspondiente al controlador PID a implementar.



**Figura 30 a) Model Output**



**Figura 31 b) Función de transferencia**

En la **figura 31 a)** se basa en la implementación de la toolbox de Matlab donde se hace una comparativa de la gráfica obtenida por medio de la data y la regresión de lineal de la respuesta del sensor y **la figura 32 b)** nos proporciona datos más exactos de cómo podemos realizar el modelamiento de la función de transferencia y obtener así un dato de cada una de las variables del controlador PID para posteriormente implementar el lazo de control en Simulink por medio del cual podemos hacer el comparativo con respecto a la entrada escalón y obtener así la respectiva grafica en cuanto a la respuesta del setpoint, en base a la respuesta del modelamiento anterior y comparando la respuesta que se observa en la figura 35 se puede deducir si el controlador está cumpliendo su función principal.

3.7.3. Simulación en Simulink: Con la planta de nuestro sistema obtenida.

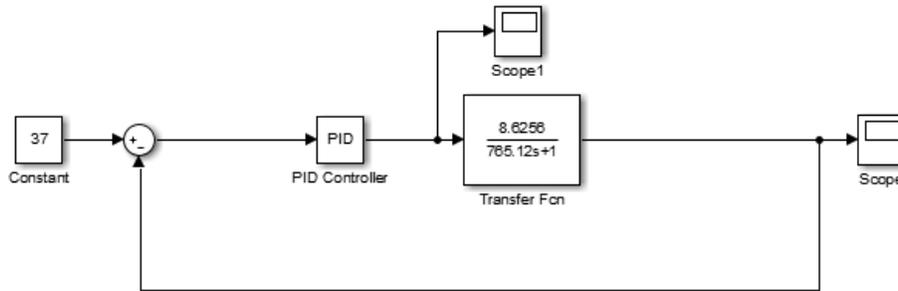


Figura 31 Controlador PID en Simulink

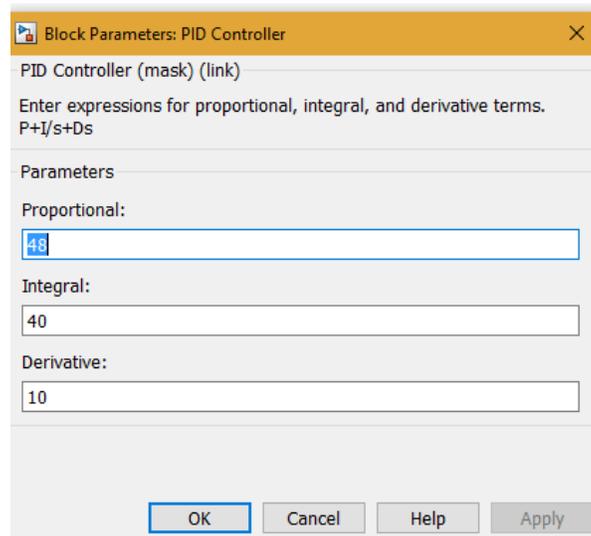


Figura 32 Constantes del Controlador PID

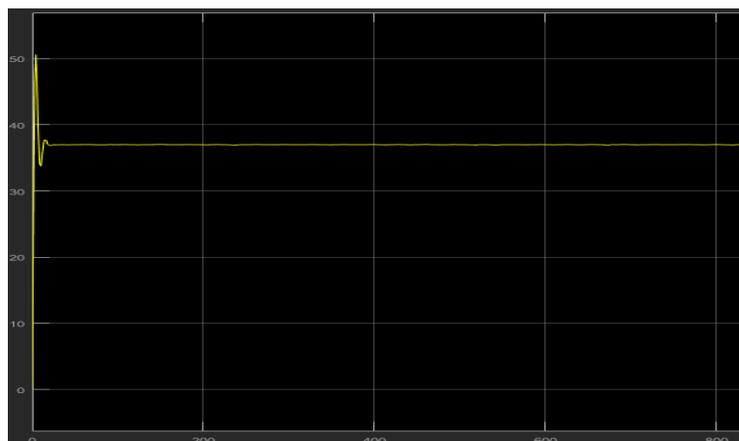


Figura 33 Salida del Controlador

En la figura 35 se puede evidenciar la respuesta del controlador a una entrada escalón unitario con el fin de poder observar el comportamiento del mismo según los datos

obtenidos por medio del análisis, la características que nos proporciona dicha grafica donde nos muestra que el controlador que se aplicó a dicho proceso nos da una respuesta controlada ya que la sobre oscilación es muy mínima con respecto a su entrada escalón que es el punto de referencia o setpoint, luego del tiempo de respuesta se logra visualizar la estabilización a no muy largo tiempo una vez se aplica la entrada al sistemas y esto es la función principal del controlador, proporcionarnos una respuesta sin oscilamiento y estabilización rápida.

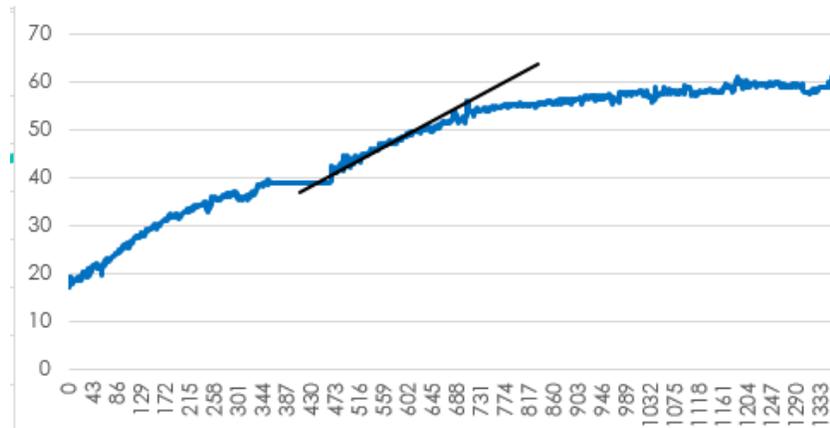
### 3.7.4. Curva de respuesta:

Conociendo el comportamiento del sistema, se aplico una salida PWM con un duty de 180 hasta que la temperatura se estabilizo en 39°C ,posteriormente se aplico un escalon cambiando el duty a 255 para llevar el sistema a su maxima temperatura 61°C, todos los datos fueron muestreados a 1Hz y registrados los valores de temperatura a traves del microcontrolador.

En la siguiente imagen se muestra el comportamiento obtenido, y en base a estos parametros se realizaron los calculos por medio de la tecnica de Ziegler-Nichols.

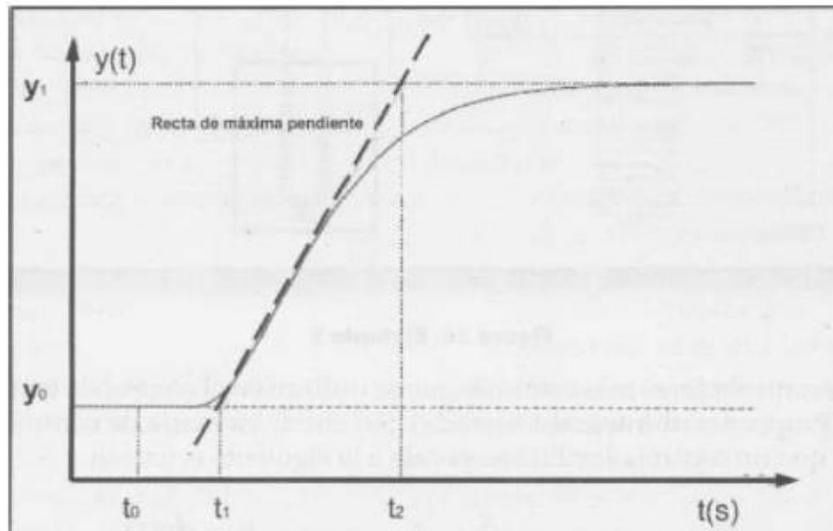
La funcion de transferencia obtenida con los datos tomados en lazo abierto es:

$$G(S) = \frac{K_o e^{-st_o}}{1+Y_o s} = \frac{8.6256}{1+765.12s} \quad (1)$$



**Figura 34** Respuesta de salida ante una entrada Escalón

En la **figura 36** se hace el análisis por medio del método de Ziegler-Nichols



**Figura 35** Respuesta de salida ante una entrada escalón.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos por medio la toolbox ident, no podría calcular los valores de las constantes  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  porque  $T_o$  es cero. Por lo cual se utilizó el método de la curva de reacción

$$T_o = t_1 - t_0 \quad (2)$$

$$y_o = t_2 - t_1 \quad (3)$$

$$k_o = \frac{Y_1 - Y_0}{u_1 - u_0} \quad (4)$$

Según Ziegler-Nichols, la relacion de estos coeficientes es la siguiente:

$$k_p = 1.2 \frac{Y_o}{K_o T_o} \quad (5)$$

$$T_i = 2T_o \quad (6)$$

$$T_d = 0.5T_o \quad (7)$$

### 3.7.5. Cálculo de las Constantes del Controlador:

Con los datos tomados de la figura 13 con referencia a la imagen 14 se hallaron las constantes del controlador PID con las fórmulas 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

$$T_o = t_1 - t_0 = 320 - 300 = 20$$

$$y_o = t_2 - t_1 = 500 - 320 = 180$$

$$k_o = \frac{Y_1 - Y_0}{u_1 - u_0} = \frac{60 - 39}{255 - 180} = 0.28$$

$$k_p = 1.2 \frac{Y_o}{K_o T_o} = 1.2 * \frac{180}{0.28 * 20} = 38.57$$

$$T_i = 2T_0 = 2 \cdot 20 = 40$$

$$T_d = 0.5T_0 = 0.5 \cdot 20 = 10$$

### Controlador digital PID

La función de transferencia para un controlador PID digital se muestra en la ecuación 1:

$$U(z) = K_p \left[ 1 + \frac{T}{T_i(1-z^{-1})} + T_d \frac{(1-z^{-1})}{T} \right] E(z) \quad (8)$$

En el dominio de la frecuencia un controlador PID se representa así.

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \quad (9)$$

Función de transferencia discreta de la ecuación 9 se representa así:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = a + \frac{b}{1-z^{-1}} + c(1-z^{-1}) \quad (10)$$

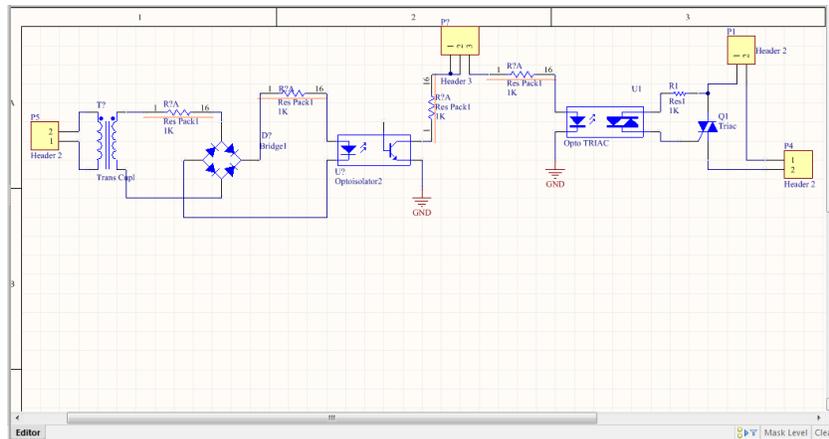
$$a = K_p \quad b = \frac{K_p T}{T_i} \quad c = \frac{K_p T_d}{T} \quad (11)$$

Con la fórmula 11 puedo calcular las constantes discretas en base al tiempo de muestreo.

Una vez obtenida la información antes mencionada se realizó el respectivo controlador de la termocupla tipo k y habiendo realizado este paso se procede a realizar lo que es el acoplamiento con la parte de potencia para así permitir que el consumo de energía de la resistencia térmica no cause afectaciones a la tarjeta de programación ni demás partes del sistema como tal.

### 3.8. DISEÑO ELECTRONICO DEL CONTROL DE POTENCIA

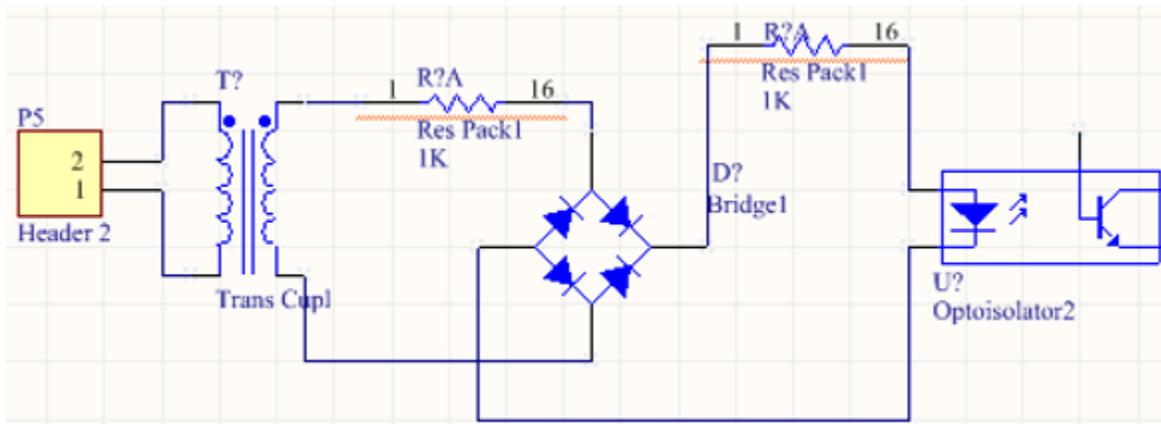
Otra de las partes del diseño de dicho dispositivo para seguir realizando el control de la termocupla y su acoplamiento, se realiza siguiente para obtener el cruce por cero y así poder realizar la activación del TRIAC y OPTORIAC respectivamente.



**Figura 36 Esquema general del control de potencia**

Un detector de cruce por cero indica básicamente cuando una señal cambia de polaridad. Es usado en circuitos donde es necesario tener una señal de referencia para realizar un control por ángulo, como en el caso de rectificadores controlados o controladores ac. Los detectores de cruce por cero son vitales en la transmisión de señales digitales a través de los circuitos de corriente alterna esto teniendo en cuenta que la termocupla y la resistencia calefactora trabajan a altos valores en cuanto a su alimentación. Una de las aplicaciones también muy importante de este método influye en que la ausencia de este componente explica por qué el audio digitalmente controlado produce ruido cuando el usuario sube muy rápido el volumen. **(Compliant, n.d.)**

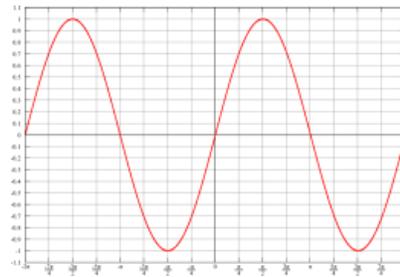
En la figura 39 podemos observar la primera parte del circuito se basa en la detección del cruce por cero a una entrada AC:



**Figura 37 Cruce por cero de la señal de entrada**

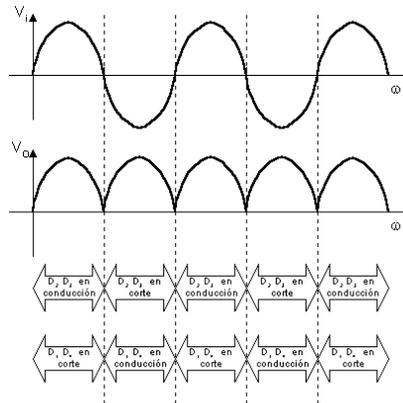
Como es el caso de la detección de cruce por cero en los opto acopladores con salida TRIAC y los circuitos detectores de cruce por cero para modulación de ciclo de trabajo para salidas con TRIAC. Esta parte consiste, pues como podemos observar tenemos la derivación del transformador de una entrada alterna de 110v a 12v luego es conducido por un puente rectificador de onda completa donde su función es la siguiente:

Esta es la señal que recibidos de la red de AC:



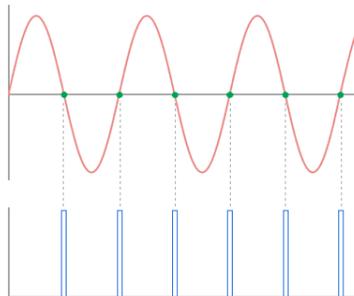
**Figura 38 Onda seno**

Esta es la señal cuando pasa por el puente rectificador de onda completa:



**Figura 39 Señal luego del paso por el puente rectificador de onda completa**

Y de esta manera nos va a permitir tener un disparo en el cruce por cero al paso del opto acoplador para poder realizar el respectivo proceso en el momento exacto donde se evidencia el cruce por cero del mismo.



**Figura 40 Disparo en los cruces por cero de la función**

## FUNCIÓN DEL OPTO ACOPLADOR:

Un opto acoplador, también llamado optoaislador o aislador acoplado ópticamente, es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor activado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente opto electrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac, también podemos decir que el optoacoplador es un tipo de protección que se puede adicionar a un circuito de potencia diseñado para transferir señales eléctricas utilizando ondas de luz y así proporcionar un acoplamiento con aislamiento eléctrico entre su entrada y salida. El propósito principal de un optoacoplador es proteger al circuito de salida frente a picos de voltajes o tensiones elevadas en su entrada que pueden dañar al otro circuito **(Ninla Elmawati Falabiba et al., 2014)**.

### Parte 2:

Activación del opto triac y el triac por medio del microcontrolador para así poder realizar el respectivo control a la carga en este caso la resistencia la cual es la encargada de proporcionar el calentamiento del vial dentro del HEADSPACE con el fin de poder obtener los volátiles presentes dentro del material que será medio de análisis.

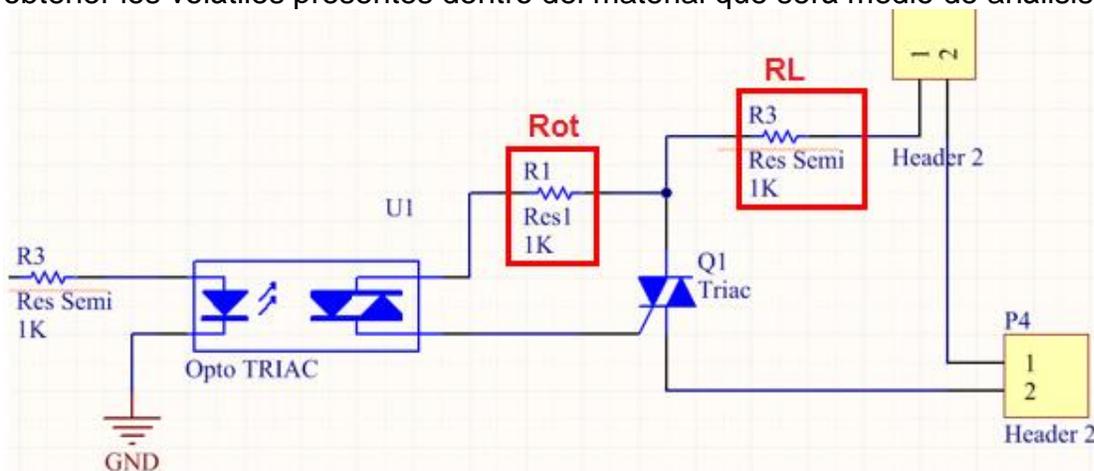


Figura 41 Parte 2 del sistema de control de potencia

### 3.8.1. OPTOTRIAC:

(MOC3031) consta de un diodo emisor de infrarrojos de arseniuro de galio ópticamente acoplada a un detector de silicio monolítico que realiza la función de una tensión cero cruces el controlador triac bilateral. Está diseñado para su uso con un triac en la interfaz de sistemas lógicos para equipo alimentado de 115 líneas Vac, tales como teletipos, CRTs, impresoras, motores, solenoides y aparatos de consumo. Un opto acoplador, también llamado optoaislador o aislador acoplado ópticamente, es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor activado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente opto electrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac. De este modo se combinan en un solo dispositivo semiconductor, foto emisor y una foto receptora cuya conexión entre ambos es óptica. Estos elementos se encuentran dentro de un encapsulado que por lo general es del tipo DIP. Se suelen utilizar para aislar eléctricamente a dispositivos muy sensibles.

## **ESPECIFICACIONES**

- Número de canales: 1
- Tensión de aislamiento: 7.5 kV
- Opto acoplador Tipo de salida: Phototriac
- Entrada de corriente: 30 mA
- Voltaje de salida: 250 V
- Corriente de entrada máxima: 30 mA
- Simplifica el control lógico de potencia 110 VAC
- Cero cruces voltaje
- Alto voltaje de ruptura: VDRM = 250 V Min
- Tensión de aislamiento de alta: VISO = 7500 V Min
- $Dv / dt$  de 100V/ $\mu$ s Typ
- Encapsulado: DIP
- Número de pines: 6

### **3.8.2. TRIAC:**

**(BT136)** Switch electrónico bidireccional de corriente alterna útil para interrumpir y/o continuar la corriente de alimentación de un dispositivo. Su versatilidad lo hace ideal para el control de corrientes alternas, una de ellas es su utilización como interruptor estático ofreciendo muchas ventajas sobre los interruptores mecánicos convencionales y los relés. Funciona como interruptor electrónico y también a pila.

## **ESPECIFICACIONES:**

- Peak Repetitive Off-State Voltage, Vdrm: 500 V
- Puerta corriente de disparo de Max (QI), igt: 70 mA
- El estado actual de TI RMS (RMS): 4 A
- Pico no Rep 50Hz Corriente de sobretensión Itsm: 25 A
- Corriente de retención Ih Max: 15 mA
- No. of Pins: 3
- TO220

Ahora debemos halla el valor de la resistencia Rot:

**Datos:**

- $V_s(t)=127v$
- $V_{gt}=1.5v$
- $V_{ton}=3v$

$$-V_s(t) + I_{Rl} * R_l + I_{ot} * R_{ot} + V_{Ton} + V_{gt} = 0 \quad (12)$$

$$I_{Rl} * R_l + I_{ot} * R_{ot} = V_s(t) - V_{gt} - V_{Ton} \quad (13)$$

$$I_{Rl} * R_l + I_{ot} * R_{ot} = 170v - 1.5v - 3v$$

Pero escenario lot:

$$V_s(t) = 120v * \sqrt{2} = 170v$$

$$I_{Rl} = I_{ot} = 40mA$$

$$I_{Rl} * R_l + I_{ot} * R_{ot} = 165.5v \quad (14)$$

$$R_l + R_{ot} = 4.1375k\Omega$$

$$R_{ot} = 4.1375k\Omega - R_l \quad (15)$$

Para hallar el valor de la resistencia de carga Rl debemos tener en cuenta las características de la resistencia como son el valor de corriente y del voltaje de alimentación:

- $V=110v$
- $I=1.5A$

Teniendo estos valores aplicamos ley de ohm y podemos hallar este valor:

$$V = I * R$$

$$R = (110V) * (1.5A) = 73.3\Omega$$

Reemplazamos este valor en la ecuación 4:

$$R_{ot} = 4.1375k\Omega - 73.3\Omega$$

$$R_{ot} = 4k\Omega$$

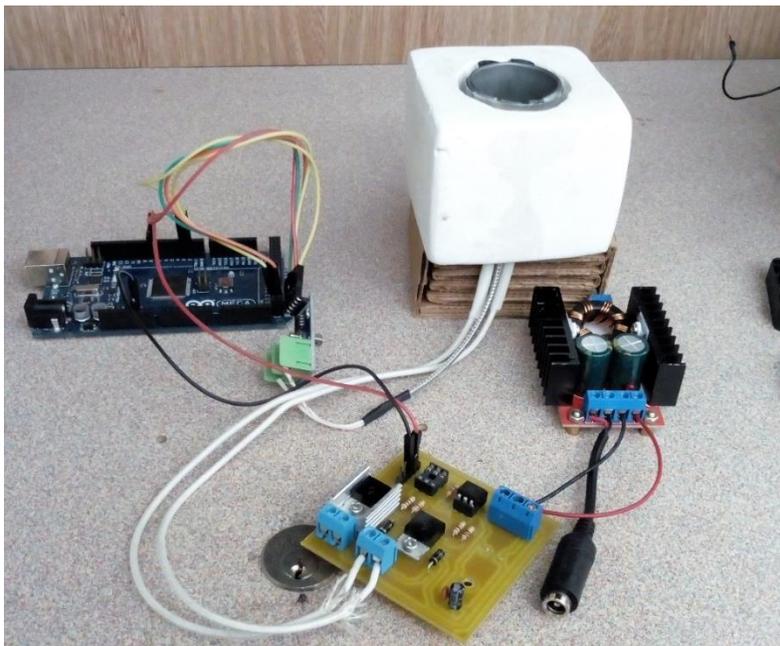
# CAPÍTULO 4

## **4.1. CONSTRUCCION**

Este capítulo del trabajo se dará evidencia del paso a paso en la construcción del headspace sampling (espacio de cabeza), que fue elaborado en los laboratorios de la Universidad de Pamplona, la idea principal de la cual surgió la elaboración de dicho dispositivo fue de la necesidad de extraer muestras de diferentes tipos de líquidos los cuales serían parte de estudios e investigaciones dentro del claustro educativo.

En la **figura 24** se muestra el diseño inicial elaborado por medio del software solidword un diseño en dimensión 3D, basado en este se determinaron materiales los cuales le permitieran a dicho dispositivo funcionar de la manera correcta para el cual fue diseñado. Como objetivo inicial para el funcionamiento de este sistema que se elaboró y se diseñó para realizar el calentamiento y la extracción de los gases volátiles presentes en diferentes tipos de muestras que iban a ser parte de un proceso de investigación, dentro del cual hizo parte el proyecto del análisis de gases del aceite de los transformadores, realizando investigaciones acerca del funcionamiento de los mismos (transformadores) se tuvieron en cuenta muchos factores y entre esos era calentar la muestra para simular su temperatura en un estado normal de trabajo y así poder hacer que las sustancias químicas internas del aceite comenzaran a emitir el tipo de gas correspondiente.

Se diseñó una resistencia de forma cilíndrica que tuviera la capacidad de cubrir de forma completa un vial en el cual se depositaría la muestra que sería analizada, esta resistencia tenía ciertas características debido a que las temperaturas a manejar serían bastante elevadas o superiores a los 50°C, en la **figura 44** se observa la prueba y análisis del sistema de calentamiento de la muestra y hablaremos de cada uno de los elementos que lo componen:



**figura 42 construcción del sistema de calentamiento**

## 1. RESISTENCIA ELÉCTRICA:

Se diseña una resistencia eléctrica como se observa en la **figura 45**, con las características necesarias para calentar el vial a temperaturas superiores a 50°C con fin de poder obtener las temperaturas similares a las cuales trabaja internamente el transformador, y por ende poder hacer el análisis del aceite dentro de sus parámetros normales de funcionamiento obteniendo los respectivos gases emanados por este con el fin de poder realizar el análisis pertinente, este dispositivo fue posible su elaboración con ciertos parámetros y medidas las cuales se enviaron al fabricante y así poder obtener las medidas y características exactas para el trabajo a realizar.



**FIGURA 43 RESISTENCIA ELÉCTRICA**

## 2. TERMOCUPLA TIPO K:

La termocupla tipo k fue el sensor utilizado para el controlar la temperatura de la resistencia eléctrica, se toma como referencia este tipo de sensor debido a su capacidad de tolerar temperaturas superiores a las indicadas para realizar el muestreo del aceite del transformador.

Una termocupla o termopar es un dispositivo para la medición de la temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz. El principio de funcionamiento de los sensores termoeléctricos se basa en los descubrimientos de Thomas Johann Seebeck (1822), Jean C.A. Peltier (1834) y William Thompson (1847), denominados efecto Seebeck, efecto Peltier y efecto Thompson.

- **EL EFECTO SEEBECK**

Consiste en la aparición de una diferencia de potencial entre dos puntos distintos de un conductor eléctrico que se encuentran de manera simultánea a diferentes temperaturas. En un termopar, el efecto Seebeck se manifiesta por la aparición de una corriente eléctrica que sólo depende de la diferencia de temperaturas entre las uniones.

- **EL EFECTO PELTIER**

Se fundamenta en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales A y B distintos al pasar corriente por ella. Este efecto, sólo depende del tipo de metal y de la temperatura T1 y T2 de las uniones.

- **EL EFECTO THOMPSON**

se caracteriza por la absorción o liberación de calor por parte de un conductor sometido a un gradiente de temperatura, por el que circula una corriente. Se libera calor cuando la corriente circula del punto más caliente hacia el más frío **(Rodríguez et al., 2007)**.



**figura 44 TERMOCUPLA TIPO K**

### **3. ARDUINO**

Hablar de una tarjeta Arduino es saber que se basa en un circuito impreso donde se puede desarrollar un tipo de programa de software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes tipos de uso, una placa basada en un microcontrolador ATMEL. Los microcontroladores son circuitos integrados en los que se pueden grabar instrucciones, las cuales las escribes con el lenguaje de programación que puedes utilizar en el entorno Arduino IDE. Estas instrucciones permiten crear programas que interactúan con los circuitos de la placa.

El microcontrolador de Arduino posee lo que se llama una interfaz de entrada, que es una conexión en la que podemos conectar en la placa diferentes tipos de periféricos. La información de estos periféricos que conectes se trasladará al microcontrolador, el cual se encargará de procesar los datos que le lleguen a través de ellos.

NOMBRE	PROCESADOR	VOLTAJE OPERACIÓN / ENTRADA	VELOCIDAD CPU	ENTRADA S/ SALIDAS ANALÓGICAS	ENTRADA S/ SALIDAS DIGITALES	EEPROM	SRAM (KB)	FLASH (KB)	USB	UART
Uno	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16MHz	6 0	14/6	1	2	32	Regular	1
Leonardo	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16MHz	12 0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
101	Intel Curie	3.3 V / 7-12V	32MHz	6 0	14/4	-	24	196	Regular	-
Esplora	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16MHz	-	-	1	2.5	32	Micro	-
Arduino Zero	ATSAMD21G18	3.3 V / 7-12 V	48 MHz	6 1	14/10	-	32	256	2 Micro	2
Mega 2560	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16 0	54/15	4	8	256	Regular	4
Due	Atmel SAM3X8E	3.3v / 7 - 12 v	84 Mhz	12 2	54/12	0	96	512	2 Micro	4

**Tabla 4 REFERENCIAS DE TARJETAS ARDUINO**

En la **tabla 7** se hace referencia de las tarjetas Arduino que fueron parte de nuestro estudio con el fin de elegir la que mejor se acomodara a las necesidades que presentaba la elaboración del proyecto y tener así la mejor forma de completar las especificaciones de dichos elementos.

En base a cada una de esas características se escoge trabajar con la tarjeta de programación Arduino due por que incorpora un microcontrolador SAM3X8E que tiene una arquitectura interna diferente a la AVR, sus registros son de 32 bits cuatro veces más grandes de lo habitual de las placas Arduino, su velocidad de reloj de 84 MHz, este microcontrolador dispone de mucha más memoria , 96 KB de SRAM y 512 KB de memoria Flash, tiene un circuito llamado controlador "DMA" que permite a la CPU acceder a la memoria de una manera más rápida, por tanto con Arduino Due se pueden hacer más cosas y más rápidamente esto permite ejecutar aplicaciones que realizan un gran proceso de datos.

Otras características de esta placa son:

- 54 pines de entrada/salida digital
- 12 de estos pueden ser usados como salidas PWM
- 12 entradas analógicas
- chips TTL-UART
- 2 conversores digitales-analógicos
- 2 puertos I2C independientes
- 1 puerto SPI
- 2 conectores mini USB, Uno del tipo mini-A USB nativo está pensado para usar la placa como un periférico USB más (como un mouse o un teclado), El mini USB más cercano al jack de alimentación es de tipo mini-B está pensado para conectar la placa al Pc y transferir desde el entorno de desarrollo

- Tiene también un switch de reinicio y un switch de borrado, el voltaje de trabajo de esta placa es de 3,3v
- Por tanto, sus pines de entrada/salida es la tensión que aportan o pueden soportar
- La intensidad ofrecida por estos pines está entre 6 mA y 15 mA y la ofrecida por los pines 3,3v y 5v es de 800 mA.

Arduino Due tiene la misma disposición que Arduino Mega por tanto puede compartir los mismos shields siempre que respeten la misma disposición y que trabajen a 3,3v.

#### 4. PROCESO DE TOMA Y ANÁLISIS DE LA MUESTRA.

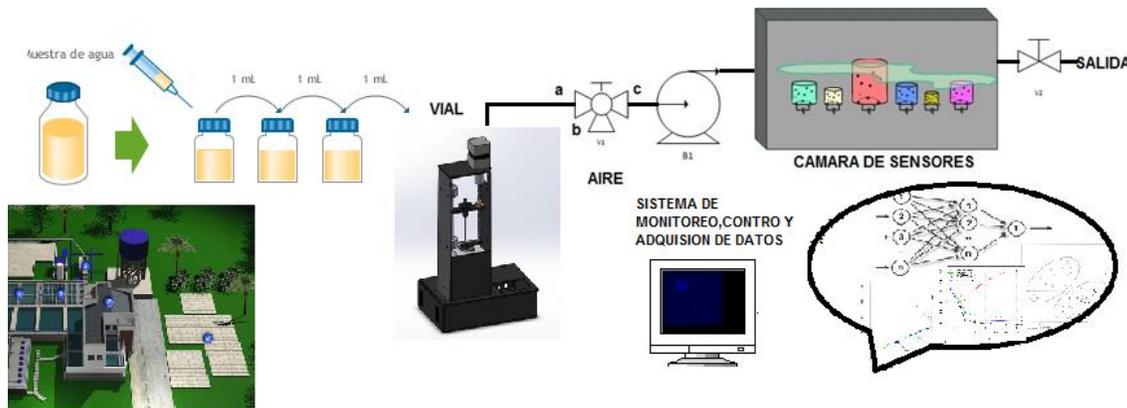


Figura 45 PROCESO DE TOMA Y ANÁLISIS DE LA MUESTRA.

En cada uno de los siguientes se explicará el paso a paso de cómo se realiza la toma de la muestra y el respectivo análisis de la misma.

#### HEADSPACE SAMPLING:

Como se mencionó anteriormente el headspace sampling es un muestreo de espacio de cabeza que utiliza para métodos de análisis de todo tipo de volátiles presentes en cualquier tipo de sustancia.

En base al concepto de trabajo de este dispositivo, nos permitimos diseñar un sistema para realizar la extracción de los volátiles presentes en el aceite de los transformadores eléctricos, este dispositivo fue construido con materiales en acrílico y de metal para darle fortaleza a la estructura como tal.

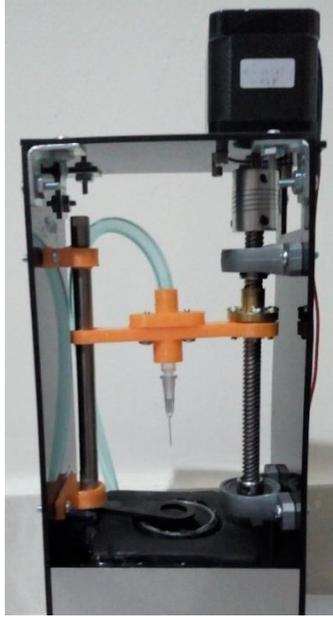
En la **figura 45** podemos observar que tal cual como se elaboró el diseño del mismo así mismo se pudo realizar la construcción el dispositivo, se emplearon métodos del corte por medio de máquinas laser para los cortes de las láminas acrílicas y de máquinas CNC para las piezas de color naranja de la imagen donde se quería encajar cada una de las piezas que lo componen y los elementos en metal se diseñaron y se enviaron a empresas encargadas de elaborar este tipo de piezas con medidas específicas y diámetros con que se debían construir.



Figura 46 Funcionamiento headspace sampling

### **FUNCIONAMIENTO:**

Para la puesta en marcha del headspace, se basa como primera medida en la programación de una tarjeta Arduino encargada de enviar orden a cada uno de los elementos que a ella están asociados, la puesta en marcha del dispositivo se realiza por medio de una pantalla táctil en la cual le enviamos a la resistencia calefactora la temperatura a la cual debía estar el vial para la extracción de los volátiles, realizando el control de esta por medio de la termocupla tipo k, quien indicaba el dato exacto, el desarrollo de este proceso se toma un tiempo determinado tiempo que tiene el vial que va internamente en la resistencia el cual contiene una cierta cantidad del aceite proporcionando un espacio libre donde estarían localizados los volátiles del mismo para poder realizar su respectiva extracción como se observa en la **figura 46**, la finalización de este proceso se puede visualizar en la pantalla táctil donde indica cada una de las cosas que se iba realizando dentro del mismo.



**Figura 47 Extracción de volátiles**

Una vez se logra alcanzar la temperatura deseada en la cual se quiere realizar el análisis de los volátiles presentes, se activa el motor paso a paso se encuentra en la parte superior del dispositivo llevando la aguja hasta el interior del vial con el fin de realizar la extracción de la muestra, y por medio de una válvula de aire estéril conducir estos gases al interior de la nariz electrónica para poder visualizar por medio de esta la respuesta de cada uno de los sensores que internamente la componen y cumplir con el objetivo principal del proyecto.

## **5. NARIZ ELECTRONICA Y SU FUNCIONAMIENTO**

En base a la información anterior sabemos que una nariz electrónica es un instrumento con una serie de sensores químicos electrónicos, con especificidad parcial, y un sistema de reconocimiento de patrones apropiado, capaz de reconocer olores simples o complejos.

Una nariz electrónica consiste en reemplazar las células receptoras de olor con sensores de gas, el procesamiento neuronal por una computadora y un software, esto es a simple vista algo más concreto de lo que es una nariz electrónica como uno de los avances tecnológicos del siglo actual.



**Figura 48 E-nose V2.0**

## **FUNCIONAMIENTO**

La nariz electrónica cuenta con una aplicación que le permite al usuario realizar la adquisición de la información o realizar el procesamiento de la misma.

El proceso de análisis del aceite del transformador, a través de la nariz electrónica, cuenta con tres etapas, las cuales tienen unos tiempos característicos que permiten una toma de muestras óptima, como se indica a continuación:

- La etapa de muestreo, donde se concentran los compuestos volátiles del fruto en una cámara para la posterior toma de datos.
- Una segunda etapa que cuenta con la medición a través de los sensores químico-resistivos, los cuales responden a la presencia de los compuestos volátiles de la muestra.
- La etapa de adquisición y procesamiento de las señales eléctricas que provienen de la matriz de sensores, para su posterior análisis.

## **ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

Para adquirir los datos y almacenar las señales de los sensores en el computador, se utilizó una tarjeta de alto rendimiento (DAQ 6009). Los datos se ingresaron en el software Bnose 2.0, que sirvió como interfaz gráfica. Este programa también permitió el manejo de los tiempos en el proceso de medición, el cual debe ser idéntico en todas las pruebas, para evitar inconvenientes en el análisis de los resultados.

El método de procesamiento utilizado fue el análisis de componentes principales (PCA), que funciona muy bien para aplicaciones que conlleven el uso de narices electrónicas, en las cuales las concentraciones de los volátiles no son elevadas y los sensores se comportan generalmente de manera lineal. El uso del algoritmo PCA en las narices electrónicas, se limita a representar gráficamente un conjunto de medidas para observar su posible agrupación (clusters), de medidas realizadas previamente **(Rivera-Guerrero et al., 2020)**.

## LA MUESTRA

La muestra del aceite de los transformadores eléctricos se adquirió por medio de la empresa de electricidad del departamento Norte de Santander (CENS), el proceso para poder obtener dicha sustancia se llevó a cabo por parte de la universidad de Pamplona, debido que tanto la universidad como el grupo de investigaciones GISM participamos en un proyecto ofertado por COLCIENCIAS y la gobernación del departamento, para la realización de dicho proyecto debíamos contar con la materia prima a cual se pudo obtener por medio de la empresa antes mostrada, debido a que esta sustancia no se encuentra al alcance de cualquier tipo de persona, solo se puede adquirir por medio de empresas que trabajen con este tipo de elementos.

Para la manipulación y consiguiente manejo de este tipo de sustancias, se recibió una capacitación por medio de la empresa, ya que ellos se deben cerciorar que este tipo de sustancia se le dé su respectivo manejo para evitar contaminación al medio ambiente y a la sociedad como tal.

La sustancia se debe mantener dentro de una jeringa de vidrio exclusiva para el manejo de este tipo de material como se ve en la figura 49, y cuenta con una válvula en su parte inferior para poder extraer el líquido del interior de la jeringa.



**Figura 49 Muestra del aceite**

En la figura 50 se puede observar el elemento que se utilizó para el depósito de la muestra y poder aplicar la extracción de los volátiles sin tener pérdidas, fue un vial que es un pequeño vaso, botella o frasco destinado a contener medicamentos inyectables, del cual se van extrayendo las dosis convenientes. Fabricados en vidrio o plástico, sirven para almacenar medicamentos o reactivos en presentación de líquidos, polvos o cápsula, este contiene en su parte superior una tapa de goma la cual permite que al ser inyectada posteriormente pueda volver a sellar sin tener pérdidas del contenido que se encuentra en su interior.



**Figura 50 Vial de deposito**

## **SOFTWARE Y SU FUNCIONAMIENTO**

Para el procesamiento y análisis de datos a raíz de la respuesta que se tuvo por medio de la nariz en cuanto a la presencia de los volátiles analizados, se realiza por medio de Matlab que es un software que nos permite una variedad de herramientas y métodos de procesamiento de datos bastante exactos en su respuesta.

La interfaz nos ofrece dos opciones, como primera medida se realiza la adquisición de los datos de cada una de las muestras a analizar para así obtener toda la información que nos ofrece la respuesta de los sensores al estímulo de los volátiles presentes en la cámara de concentración de la nariz electrónica y una vez se obtiene la información de los sensores se realiza el procesamiento de los datos por medio de un proceso llamado PCA es un método de reconocimiento de patrones no supervisado, donde la matriz  $X$  se descompone en un producto de otras dos matrices: puntajes ( $T$ ) y cargas ( $Pt$ ). Para estos nuevos ejes, los componentes principales (PC) se calculan a través de algoritmos. La primera PC, por lo general, pero no siempre, contiene la varianza máxima explicada del conjunto de datos. La segunda PC contiene una varianza explicada más baja que la PC1 y más alta que la PC3, y así sucesivamente. Por lo tanto, para elegir el número adecuado de PC, es posible evaluar el porcentaje de varianza explicada, la varianza explicada acumulativa o los valores propios (**Rivera-Guerrero et al., 2020**).



Figura 51 Interfaz de procesamiento y adquisición de datos

En la **figura 51** se puede observar la interfaz que se diseñó para el procesamiento y análisis de los datos, el uso del módulo de adquisición es muy sencillo, se coloca el nombre de la muestra, cuantas muestras se van a tomar y se da inicio al proceso, esto nos permite tener un software intuitivo que es la idea y que se puedan aprovechar mucho mejor los recursos con los que se cuenta el programa de fondo, pues la adquisición de los canales y su posterior almacenamiento.

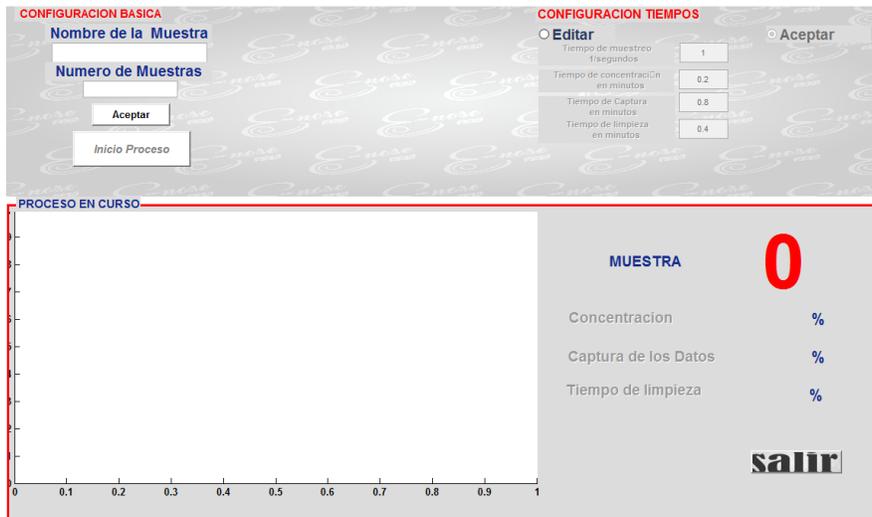


Figura 52 Interfaz de respuesta de la muestra

En la **figura 52**, se observa el módulo de adquisición de datos en respuesta al estímulo producido sobre los sensores presentes en la nariz electrónica, en esta interfaz lo que se debe hacer es asignar es en la parte superior izquierda el nombre de la muestra, el numero de la muestra y el parte superior derecha se debe asignar los tiempos de muestreo, que como recomendación se debe colocar en el tiempo de muestreo, tiempo de concentración, tiempo de captura y tiempo de limpieza asignar el mismo tiempo en

cada uno de estos ítems para poder obtener una matriz de igual tamaño para cada uno de las muestras tomadas.

Una vez se asignan cada uno de estos datos se da inicio al proceso para así obtener la información de los volátiles en la muestra, para el proyecto en mención se utilizaron muestras a diferentes temperaturas para observar cómo era el comportamiento de los sensores en cada una de estas variaciones y que tanto podía discriminar y clasificar como tal los datos de respuesta.

# CAPÍTULO 5

## 5.1. RECOLECCION DE MUESTRAS

Este capítulo se basa en la explicación del método que se utilizó para toma y recolección de cada una de las muestras para su respectivo análisis, este se llevó a cabo por medio de la nariz electrónica antes mencionada perteneciente al grupo de investigación de la universidad de pamplona GISM y también se utiliza el método de head space sampling (muestreo de cabeza), para el calentamiento y extracción de los volátiles presentes dentro del aceite de los transformadores eléctricos.

La recolección del aceite, se logró por medio de la empresa de electricidad de Norte de Santander CENS, donde se le planteo a dicha empresa el proyecto presentado a Colciencias quien se encargó del financiamiento y aprobado por COLCIENCIAS en convenio con la gobernación del departamento con el fin de dar solución a una problemática y beneficio al departamento, por medio de la empresa de energía antes mencionada se realizó una capacitación con el fin de dar el respectivo manejo a los desechos y uso del aceite en mención, donde nos mostraban que ellos como empresa encargada del manejo y residuos de los mismo con el fin de no afectar el medio ambiente, donde por medio del personal de mantenimiento de la empresa en mención se procede a extraer de uno de los transformadores en uso por medio de una jeringa de vidrio diseñada y utilizada para dar manejo a la toma de muestras y su análisis de cromatografía por parte de la empresa se logra obtener una cantidad necesaria para poder trabajar desde los laboratorios de la universidad de pamplona.

### 5.1.1. CALENTAMIENTO DE LA MUESTRA.

Previamente el calentamiento del aceite se realiza por medio del head space sampling, se extrae la cantidad de aceite necesario para la elaboración de dicha muestra con el fin de poder agregarlo al vial de vidrio el cual se debe sellar de forma hermética para así evitar la fuga de dicho volátiles y poder asegurar la máxima cantidad de los mismo allí presentes, este dispositivo de espacio de cabeza está diseñado para hacer dicho calentamiento en diferentes temperaturas, basado en un programa implementado en un tarjeta programable, donde se da la opción de elegir la temperatura deseada para el análisis de la muestra y así mismo poder calentar el vial, se ingresa por medio de una pantalla touch que lo compone, en la **figura 53** se puede observar el análisis de la muestra a una temperatura ambiente y adicional la reacción que tuvieron los sensores en presencia de los volátiles emanados y presentes en la cabeza del vial.

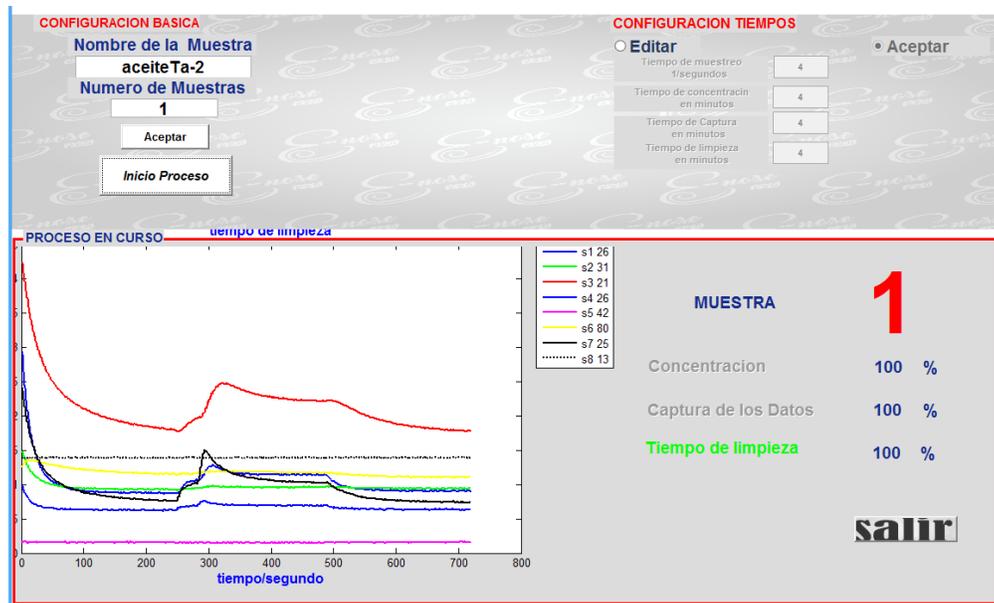


Figura 53 Muestra a temperatura ambiente.

En la figura 54, se aplica a la muestra localizada en el vial una temperatura de 30°C para observar cómo es la reacción de los sensores ante el aumento de la temperatura y así poder captar cada uno de los datos que estos nos entregan para su respectivo análisis.

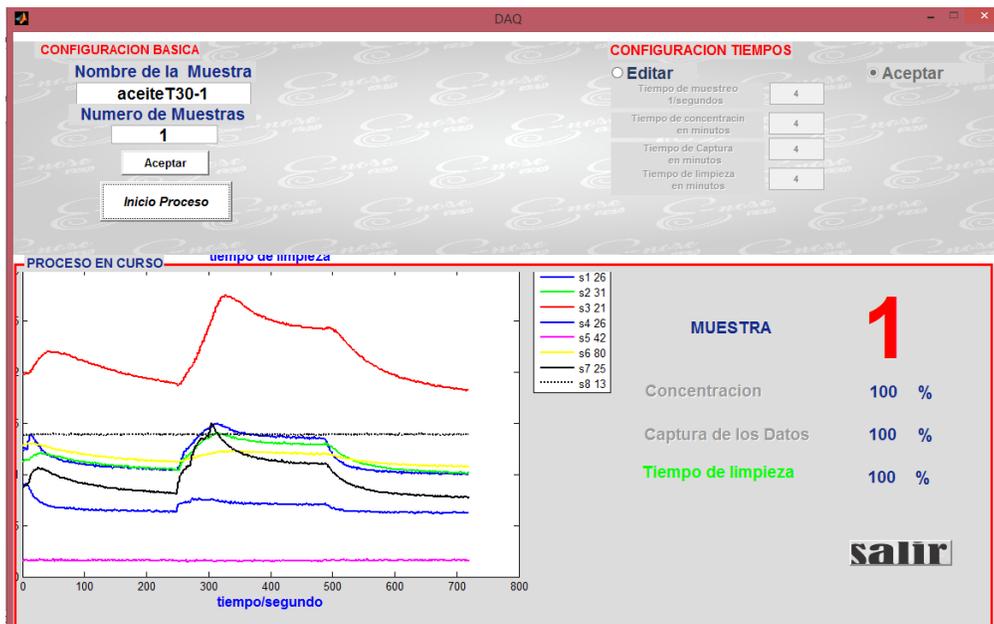


Figura 54 Muestra a temperatura de 30°C

En la figura 55, se aplica a la muestra localizada en el vial una temperatura de 40°C donde se puede observar la variación de la respuesta en cada una de las líneas con respecto a su amplitud en comparación a la imagen anteriormente mostrada, cabe resaltar que cada una de las respuestas que se pueden observar corresponden a diferentes tipos de gases a los cuales los sensores son capaces de detectar.

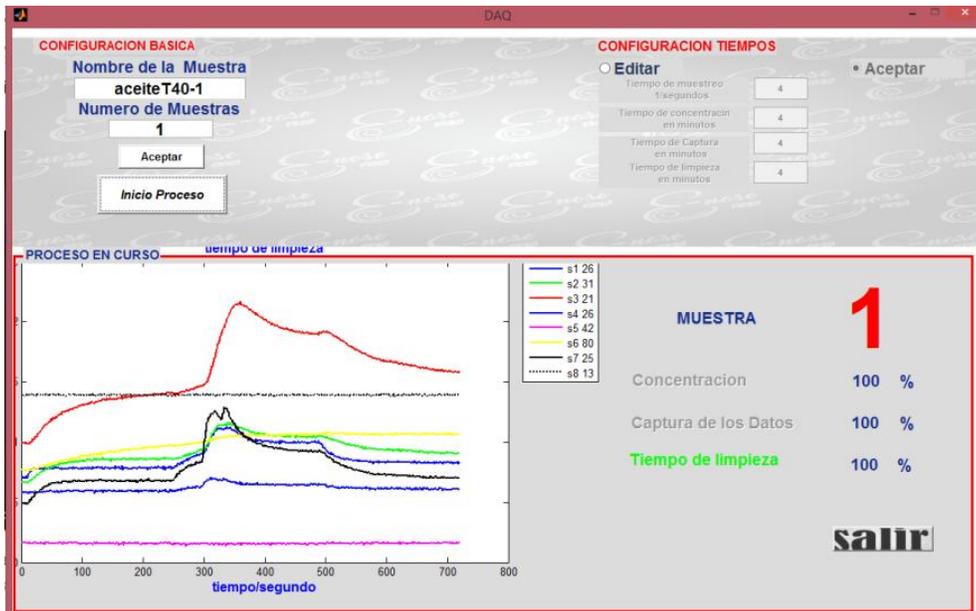


Figura 55 Muestra a temperatura de 40°C

En la **figura 56**, se aplica a la muestra localizada en el vial una temperatura de 50°C donde se puede observar la variación de la respuesta en cada una de las líneas con respecto a su amplitud en comparación a la imagen anteriormente mostrada, cabe complementar que cada una de las muestras se debe tomar en el mismo tiempo para así obtener el mismo tamaño de los datos y poder aplicar el respectivo análisis PCA en cuanto a la respuesta obtenida.

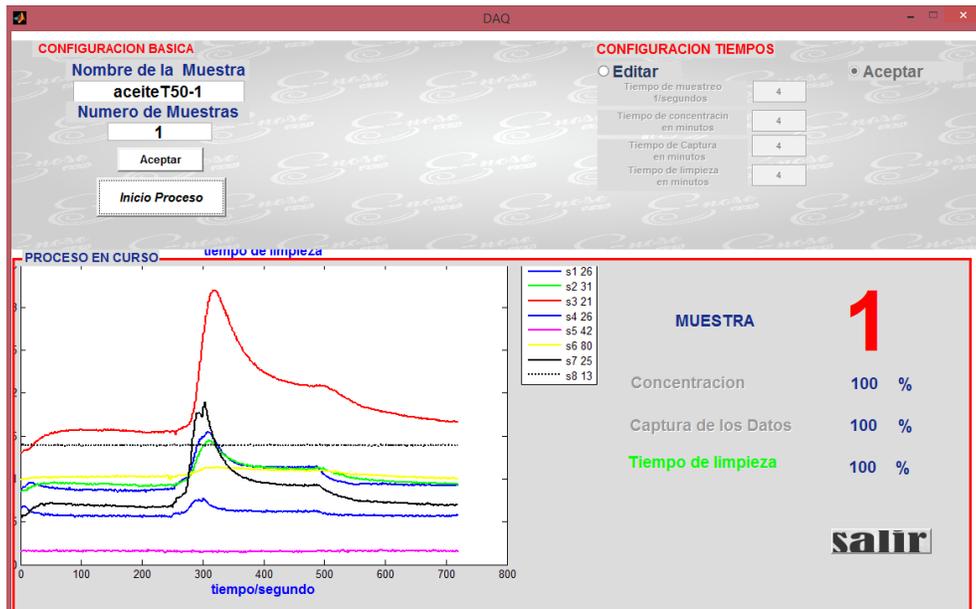
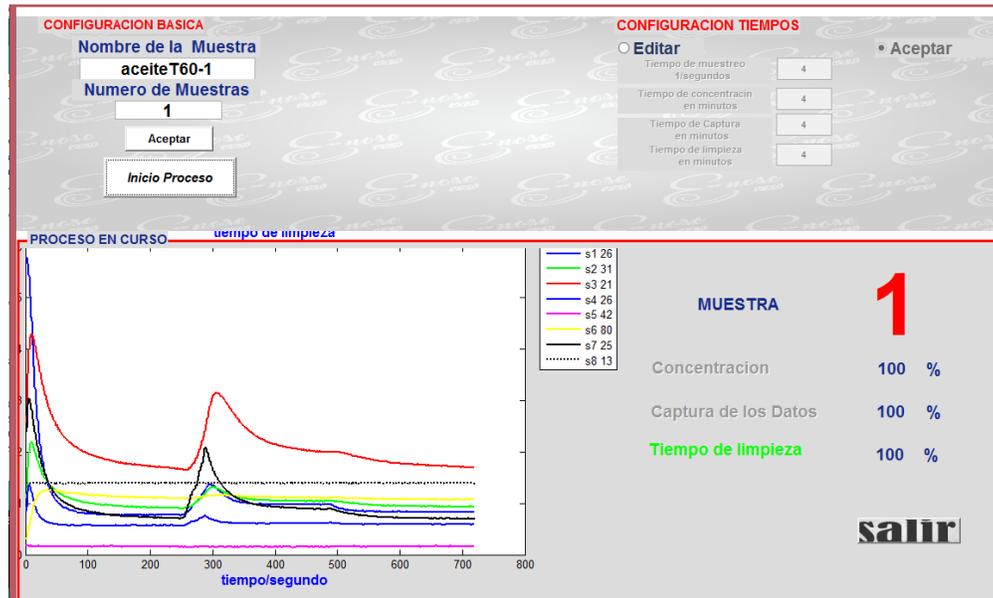


Figura 56 Muestra a temperatura de 50°C

En la **figura 57**, se aplica a la muestra localizada en el vial una temperatura de 60°C donde se puede observar la variación de la respuesta en cada una de las líneas con respecto a su amplitud en comparación a la imagen anteriormente mostrada, la captación de cada una de estos datos nos representa la sensibilidad de dichos sensores ante la presencia de los volátiles emanados por el aceite dieléctrico analizado.



**Figura 57 Muestra a temperatura de 60°C**

En las figuras anteriormente mostradas se visualiza la variación en la respuesta de los sensores capaces de percibir a temperaturas tanto ambiente como a partir de los 30°C hasta 60°C en un intervalo de variación de la 10 por cada una de las muestras.

A partir de la información genera por los sensores en cada una de las muestras se procede al siguiente paso que es el procesamiento de los datos por medio del análisis PCA antes mencionado.

El procesamiento de la E-nose, es un procesamiento sencillo donde se tiene en cuenta la conductancia mínima menos la conductancia máxima, y luego se realiza el análisis estadístico de componentes principales, para la carga de datos y poder ejecutar este componente se crea una nueva carpeta donde se unen todas las muestras que deben tener el mismo tamaño, este se tiene en cuenta cuando se ingresar los mismos tiempos a cada una de las etapas en la cuales está compuesta la adquisición de la señal, luego se ejecuta el módulo estadístico de procesamiento.

# CAPÍTULO 6

## 6.1. PCA.

Este capítulo está basado en el desarrollo del análisis de componentes principales PCA que es una técnica de extracción de datos ampliamente utilizada en la actualidad. El objetivo principal que persigue dicha herramienta es reducir la dimensionalidad de un conjunto de observaciones con una gran cantidad de variables, ayudándose del estudio de la estructura de varianzas-covarianzas entre las variables que componen los datos de entrada. A partir de la proyección de los datos de entrada sobre las direcciones de máxima varianza se obtendrá un nuevo espacio de representación de los datos en el que se puede eliminar fácilmente aquellas componentes con menor varianza, garantizando la mínima pérdida de información.

Luego de obtener el análisis mencionado anteriormente se debe llevar la información entregada por cada uno de los sensores por el entrenamiento de una red neuronal para su respectivo entrenamiento y así poder elegir dependiendo de la respuesta la que se acople de la mejor manera a la respuesta que se obtuvo a partir de la información suministrada.



figura 58 Procesamiento de datos

En la **figura 58** se da a conocer como es el debido proceso para cargar y analizar los datos en los análisis de componentes principal, se toma solo una muestra aleatoria de los datos obtenidos, esto se realiza para luego si hay necesidad de entrenar y validar un clasificador tipo red neuronal la información sea diferente y no estar realizando redundancia de datos, de esta manera se puede inferir que los resultados sin importar si son buenos o malos cumplen con los requisitos para contemplarse como válidos y extraer las conclusiones necesarias. El primer paso para realizar este procesamiento es cargar los datos al software, elegir un tipo de reprocesamiento para la información que en

nuestro caso elegimos Gmax-Gmin/Gmax, siendo la metodología más común en este tipo de casos, pero no la única, luego ejecutamos el módulo de PCA y este nos muestra un porcentaje del 93.7% de asertividad en la discriminación de los datos.

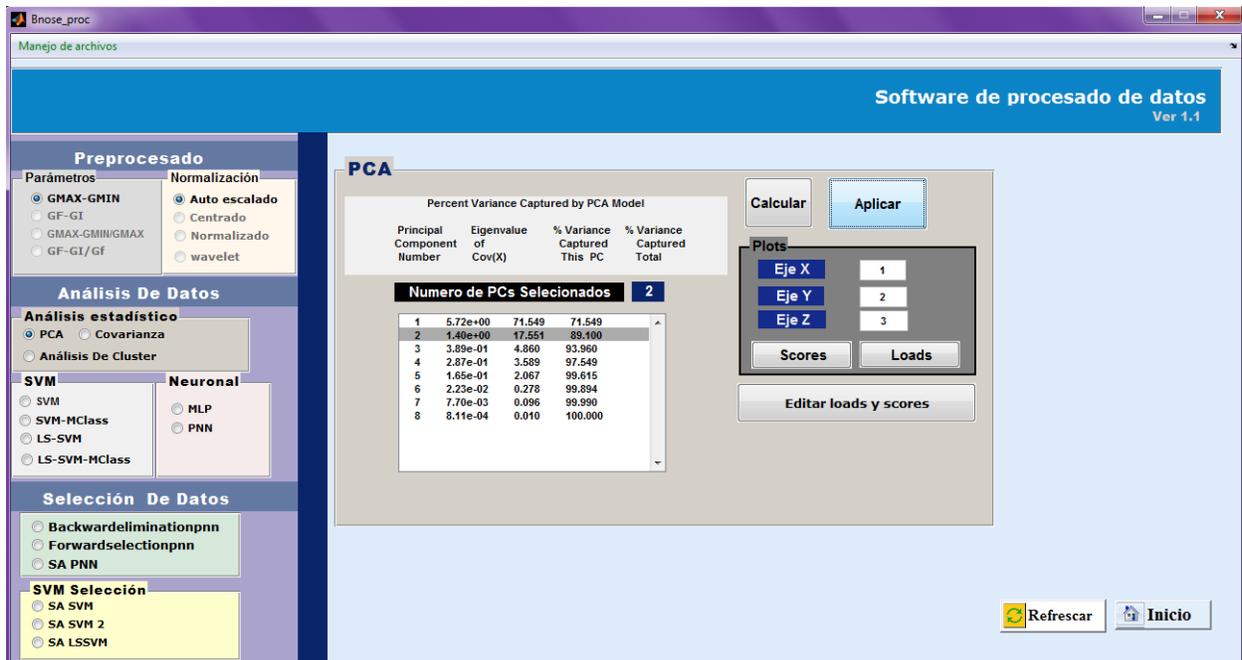


Figura 59 análisis PCA

Luego de aplicar el primer análisis PCA a las muestras tomadas desde la temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura de 60°C se toma como referencia las gráficas obtenidas por la discriminación que realizo en software una vez se le ingresaron lo datos anteriormente mencionados.

En la siguiente figura podemos observar y así concluir que a partir de la variación de la temperatura que se le aplica al aceite depositado dentro del vial, por medio del análisis de los componentes principales, me permite clasificar en tres grupos de variables como lo son, el circulo de color amarillo me agrupa las respuestas de los sensores a una temperatura entre los 50 y 60°C, el cuadrado de color naranja la respuesta a una temperatura de entre 30 y 40°C, por ultimo nos agrupa la respuesta de la temperatura ambiente que la podemos ver en el rectángulo de color verde a una temperatura de 20°C incluyendo la temperatura ambiente.

Esta información nos muestra claramente que va a ser posible clasificar la información de las clases, pero lo más importante que si buscamos un análisis cualitativo la nariz se encuentra completamente capacitada para diferenciar entre la presencia de otros tipos de gases, aunque dentro del rango de los cuadrantes presentes en la distribución del plano que me muestra la grafica se ve una variación de algunas de las variables que se solapan o rebosan el cuadrante de clasificación del mismo y así dando claridad a que la clasificación que este realizo no tiene una asertividad del 100% que seri lo ideal, pero si se logra clasificar las presencia de diferentes gases allí presentes a temperaturas variables.

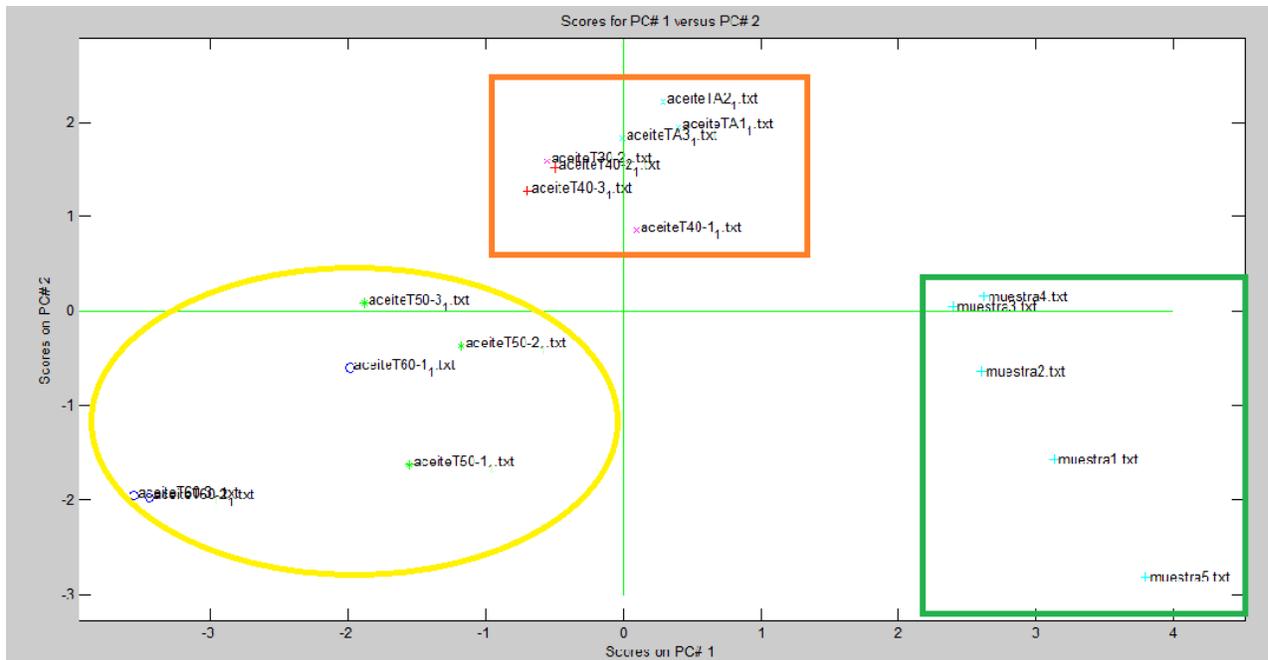


Figura 60. Respuesta entregada luego del análisis PCA

En la figura a continuación se visualiza la clasificación de los datos tomados por los sensores de contenidos en la cámara de gases.

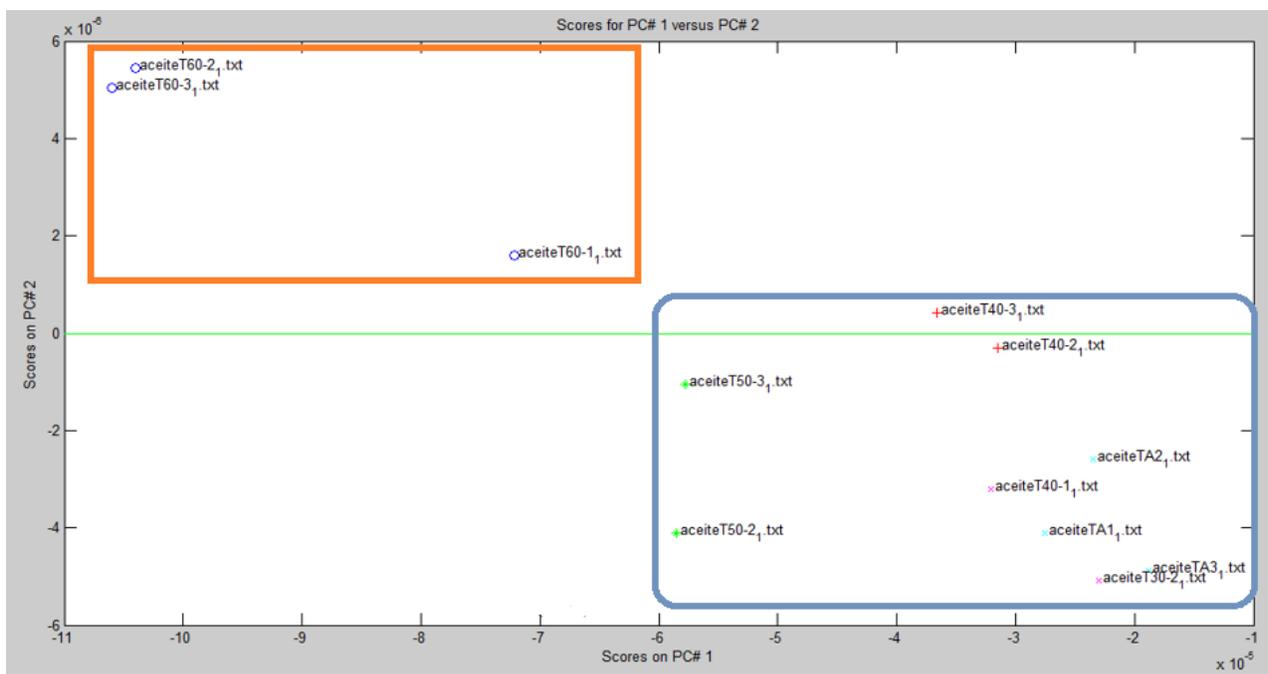


Figura 61. Respuesta del análisis PCA con diferente muestra

## INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El procesamiento de la información es una de las partes más críticas de los sistemas multisensoriales, pues, aunque se tenga una buena respuesta de los sensores el resultado es producto de que se estructura una buena forma de reconocer los patrones productos de la extracción de datos. Las redes neuronales (ANN) es una técnica de procesamiento de información inspirada en la habilidad del cerebro humano. La ANN requiere un entrenamiento para poder concebir las relaciones entre las entradas y salidas de la información, también tiene el poder de predecir comportamiento o estados de información. Una de las principales fortalezas de las redes neuronales es su capacidad de aproximar funciones no lineales, que puede ser explotado en los campos de control en el tiempo, o en optimización de problemas. Una de las elecciones más difíciles de realizar es decidir la arquitectura de la red que se va a implementar, en ellos encontramos capa única, o múltiples capas. (IBM SPSS-Redes Neuronales 28, n.d.)

### RED NEURONAL

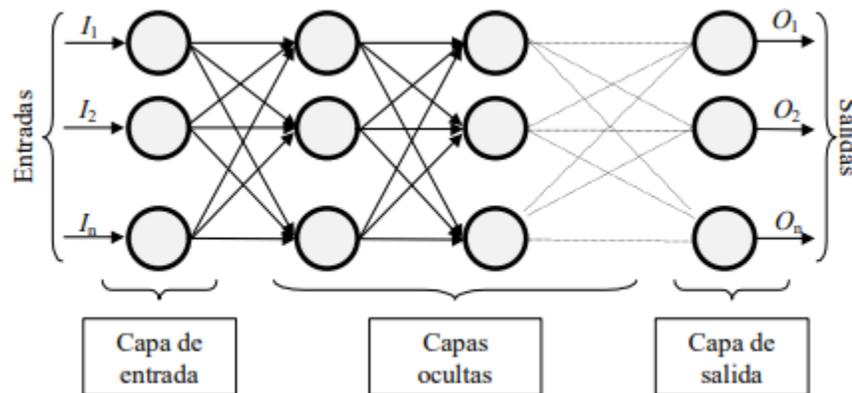


Figura 62. Red neuronal totalmente conectada.

### FUNCIÓN DE ENTRADA

La neurona trata a muchos valores de entrada como si fueran uno solo; esto recibe el nombre de entrada global. Los valores de entrada se multiplican por los pesos anteriormente ingresados a la neurona. Por consiguiente, los pesos que generalmente no están restringidos cambian la medida de influencia que tienen los valores de entrada. Es decir, que permiten que un gran valor de entrada tenga solamente una pequeña influencia, si estos son lo suficientemente pequeños

El entrenamiento de las redes neuronales dentro del software en desarrollo, se realiza por medio de un perceptrón multicapa el cual permite un mejor entrenamiento y aprendizaje de la misma.

## **FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN:**

Una neurona biológica puede estar activa (excitada) o inactiva (no excitada); es decir, que tiene un “estado de activación”. Las neuronas artificiales también tienen diferentes estados de activación; algunas de ellas solamente dos, al igual que las biológicas, pero otras pueden tomar cualquier valor dentro de un conjunto determinado. La función de activación calcula el estado de actividad de una neurona; transformando la entrada global.

## **FUNCIÓN DE SALIDA**

El último componente que una neurona necesita es la función de salida. El valor resultante de esta función es la salida de la neurona  $i$ ; por ende, la función de salida determina que valor se transfiere a las neuronas vinculadas. Si la función de activación está por debajo de un umbral determinado, ninguna salida se pasa a la neurona subsiguiente. (Savage et al., 2021).

Las redes neuronales son sistemas dinámicos auto adaptativos. Esto debido a la capacidad de autoajuste de los elementos procesales (neuronas) que componen el sistema. Son dinámicos, pues son capaces de estar constantemente cambiando para adaptarse a las nuevas condiciones.

En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertos resultados específicos. Una red neuronal no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de pesos en los enlaces mediante el aprendizaje. También existen redes que continúan aprendiendo a lo largo de su vida, después de completado su período de entrenamiento.

La función del diseñador es únicamente la obtención de la arquitectura apropiada. No es problema del diseñador el cómo la red aprenderá a discriminar. Sin embargo, sí es necesario que desarrolle un buen algoritmo de aprendizaje que le proporcione a la red la capacidad de discriminar, mediante un entrenamiento con patrones.

Las redes neuronales MLP o perceptrón multicapa se suele entrenar por medio de un algoritmo de retro propagación de errores o BP (Back Propagation) de ahí que dicha arquitectura se conozca también bajo el nombre de red de retro propagación. El desarrollo del algoritmo BP resulta una curiosa historia de redescubrimientos y olvidos. (INFORMEMAESTRIA JESUS ORTIZ, n.d.)

El software con el cual se desarrolló a la adquisición de los datos también nos permite hacer un entrenamiento de una red neuronal para la respectiva clasificación.

Se establece el entrenamiento de una red neuronal MLP como clasificador para los datos obtenidos a partir de la respuesta de los sensores compuestos en el sistema, pero que son diferentes a los utilizados en la PCA, el método de entrenamiento de la red neuronal será por partes, donde se entrena con una data, y se valida con otra completamente

distinta para poner a prueba la robustez del algoritmo obtenido, definiendo como un primer ítem 5 neuronas en la capa oculta y 1 neurona en la capa de salida, con funciones de activación Tansig en la capa oculta y Purelin en la capa de salida, el número de iteraciones programadas antes de volver a correr el algoritmo sin encontrar unos buenos parámetros es de 100. Todos estos parámetros se pueden encontrar en la figura 25, una vez definidos por el usuario, se da la orden de comenzar a calcular la MLP, una vez finalizado el entrenamiento se encuentran los siguientes resultados.



Figura 63. Respuesta del perceptrón MLP.

Se crean las muestras están preestablecidas desde un comienzo y se puede encontrar que la Y prueba es la muestra que se esperaba encontrar y la Y es la muestra determinada por el algoritmo, en la siguiente columna se muestra el acierto de la red neuronal y arroja que da un 100% en el momento de realizar la clasificación, de cada una la data obtenida.

## **CONCLUSIONES**

Desarrollando el proyecto y con el gran aporte del grupo de investigación GISM, se contaba con el sistema multisensorial el cual se adaptó para poder trabajar con el aceite de los transformadores, lo que nos llevó a poder adaptar los sensores allí presentes para poder tomar cada uno de los datos de los gases que se pudieron extraer.

Para la fabricación del sistema de extracción conocido como head space sampling donde la función principal es hacer un muestro de volátiles dentro de un espacio en la parte superior del líquido al cual se le está realizando el respectivo estudio, se creó la idea debido a que no se contaba con un mecanismo para realzar dentro de los laboratorios de la universidad este tipo de extracción de gases, para cualquier tipo de líquido, este se diseñó y se implementó con el fin de poder adaptarlo a cualquier sistema multisensorial con los cuales se cuenta, se realizó la limpieza de la manguera de acero inoxidable por medio de aire limpio con el fin de poder contar con muestras totalmente limpias en el momento de realizar el análisis de las mismas.

Luego de adaptar tanto el sistema multisensorial como el sistema de extracción de volátiles la siguiente función fue poder hacer pruebas, donde queríamos observar cómo era el comportamiento de los sensores ante este tipo de gases que se debían analizar, cuando se obtuvo la primera señal en respuesta a la reacción de los sensores se hizo una investigación de poder corroborar que si la respuesta de dichos sensores estaba enlazada con los gases presentes, haciendo una comparación con datos reales en cuanto al datashet de los sensores y también al tipo de aceite el cual se estaba utilizando para este análisis como tal, dando así una respuesta asertiva de la información que se estaba viendo reflejada en cada una de las gráficas obtenidas.

Se tomaron alrededor de 60 muestras donde se hizo de una toma de 10 datos por cada una de las muestras en las cuales fueron 6 tipos de variación de la temperatura, esto con el fin de poder darle al sistema la cantidad de datos posibles y así poder tener una información más exacta en el momento realizar el análisis de PCA donde se podían clasificar los gases y los grupos que se pudieron observar dentro de la respuesta de los mismos.

Una vez realizado el respectivo análisis por medio del PCA se procede a realizar el entrenamiento de la red neuronal para poder determinar si la clasificación realizada por medio fue la correcta, obtenido como respuesta una clasificación del 100%, donde se puede concluir que la cámara de sensores pudo discriminar y clasificar los gases presentes en cada una de las modificaciones que se fueron aplicando al aceite, y así hacer pruebas con el fin de asemejar a este en funcionamiento interno en los transformadores.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Aleixandre, M., Matatagui, D., Santos, J. P., & Horrillo, M. C. (2014). Cascade of Artificial Neural Network committees for the calibration of small gas commercial sensors for NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> and CO. *Proceedings of IEEE Sensors, 2014-Decem*(December), 1803–1806. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985376>
- ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS PARA EL. (2014). 614, 2014.
- Arian Control & Instrumentation. (2013). Tipos de termocupla. *Arian S.A Santiago de Chile*, 10.
- Bosch, S. R., & Lecha, B. (2001). *Diseño y realización de una nariz electrónica para la discriminación de aceites*.
- brettis. (2013a). *Aceites Para Transformadores*. Modulo 8. <http://www.brettis.com/Tutorial/08Transformadores.pdf>
- brettis. (2013b). *Aceites Para Transformadores*. Modulo 8.
- Cerón, A. F., Orduña, I. F., Aponte, G., & Romero, A. A. (2015). *Panorama de la Gestión de Activos para Transformadores de Potencia Overview of Asset Management for Power Transformers*. 26, 99–110. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300014>
- Compliant, R. (n.d.). *Dispositivos de estado sólido*. 138. <http://www.optecpower.com/Download/ManualOPTEC.pdf>
- De, N. (2010). “ *Procedimiento para realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases en transformadores de potencia* .”
- Eduardo, J., Sandoval, O., & Organoclorados, D. D. E. P. (2016). *No Title*.
- *El mantenimiento a los transformadores de potencia ; su análisis en el caso de Maintenance of power transformers ; its analysis in the case of a Cuban thermal*. (2011).
- *El Transformador El Transformador Pi = Ps*. (n.d.). 1–2.
- Electric, N. (2007). *Fluido Envirotemp Fr3*. 2007.
- Electrónica, L. A. N., & Novedosa, U. N. A. (2011). *La nariz electrónica, una novedosa herramienta para el control de procesos y calidad en la industria agroalimentaria*. 45, 209–217.
- Energ, P., & Nacional, T. (2020). *2020- 2050* -.
- García Vélez, E. O. (2010). *Diagnóstico y mantenimiento de transformadores de gran potencia en aceite*. 128.
- Lv, G., Cheng, H., Zhai, H., & Dong, L. (2005). Fault diagnosis of power transformer based on multi-layer SVM classifier. *Electric Power Systems Research*, 75(1), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.07.013>
- Moreno, I., Caballero, R., Galán, R., Matía, F., & Jiménez, A. (2009). La Nariz Electrónica : Estado del Arte. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 6(3), 76–91. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(09\)70267-5](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70267-5)
- Ninla Elmawati Falabiba, Anggaran, W., Mayssara A. Abo Hassanin Supervised, A., Wiyono, B. ., Ninla Elmawati Falabiba, Zhang, Y. J., Li, Y., & Chen, X. (2014). 濟無No Title No Title No Title. *Paper Knowledge . Toward a Media History of*

*Documents*, 5(2), 40–51.

- *No Title*. (n.d.).
- *No Title*. (2013).
- Ortiz, J. E., Gualdrón, O., & Duran, C. M. (2016). Detection of pesticide in the vesca fregaria through an electronic nose. *CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, Proceedings of IEEE Chilecon 2015*, 679–683. <https://doi.org/10.1109/Chilecon.2015.7404643>
- Paredes-doig, A. L., Sun, R., Picasso-escobar, G., Doig-camino, E., & Comina, G. (n.d.). *Implementación y evaluación de una nariz electrónica para la detección de alcoholes lineales Implementation and evaluation of an electronic nose for the alcohols detection Implementação e avaliação de um nariz eletrônico para detectar álcoois lineares Int.*
- Rivera-Guerrero, M. A., Gualdrón-Guerrero, O. E., & Torres-Chávez, I. (2020). Detección de pesticidas en el durazno (prunus pérsica) mediante una nariz electrónica. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 10(2), 359–365. <https://doi.org/10.19053/20278306.v10.n2.2020.10724>
- Rodríguez, E. J. A., Ocampo, J. W. M., & Ortega, C. A. S. (2007). Medición de temperatura: sensores termoelectricos. *Scientia Et Technica*, 13(34), 1–6. <https://doaj.org/article/482a2ec39c83453ba2a590ddfcee4a89>
- Sánchez, G. C. (2015). *APLICACIONES INDUSTRIALES Análisis de gases disueltos para monitoreo y diagnóstico de transformadores de fuerza en servicio Dissolved gas analysis for monitoring and power transformers in service diagnosis. XXXVI*, 180–189.
- Sendt, C. B., & Manuel, D. C. (2014). Nariz electrónica para determinar el índice de madurez del tomate de árbol ( *Cyphomandra Betacea* Sendt ) Electronic Nose to Determine the Maturity Index of the Tree Tomato. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 15(3), 351–362. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(14\)70346-4](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(14)70346-4)
- Titulación, T. D. E., La, P. A., Del, O., Ingeniero, T. D. E., & Electrónica, E. N. (2017). *AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL “ DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE OLOR EN UN SISTEMA ROBÓTICO .”*
- Alberto Ruiz Marta Susana Basualdo Autor, C., & Jorge Matich, D. (n.d.). Cátedra: Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos-Orientación I Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones.
- IBM SPSS-Redes neuronales 28. (n.d.).
- INFORMEMAESTRIA JESUS ORTIZ. (n.d.).
- Larrañaga, P. (n.d.). Tema 8. Redes Neuronales.
- Olabe, X. B. (n.d.). REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y SUS APLICACIONES.
- PROYECTO FIN DE CARRERA ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES: VERSIONES DISPERSAS Y ROBUSTAS AL RUIDO IMPULSIVO. (n.d.).

- Savage, J., Negrete, M., Estrada, H., Martell, R., & Cruz, J. (2021). Lección 4 Análisis de Componentes Principales (Principal Component Analysis, PCA).
- Tema 3: Análisis de Componentes Principales. (n.d.).