

**DETECCIÓN DE LOS INSECTOS DE LA SUBFAMILIA
TRIATOMINAE BASADO EN NARICES ELECTRÓNICAS**

LUISA FERNANDA RUIZ JIMÉNEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018**

**DETECCIÓN DE LOS INSECTOS DE LA SUBFAMILIA
TRIATOMINAE BASADO EN NARICES ELECTRÓNICAS**

LUISA FERNANDA RUIZ JIMÉNEZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Master en ingeniería de Telecomunicaciones**

Director

HOMERO ORTEGA BOADA

PhD. Ingeniería

Codirectores

DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO

PhD. en Ingeniería Biomédica

JONNY EDWARD DUQUE LUNA

PhD. en Ciencias Biológicas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, y al Centro de Investigaciones en Enfermedades Tropicales CITROP, por participar en la formación de Master en Ingeniería de Telecomunicaciones.

Al profesor Homero Ortega como director, Daniel Sierra Bueno y Jonny Edward Duque como co-directores, por su tiempo, apoyo y dedicación en la realización del presente trabajo de investigación.

Finalmente agradezco a la familia de investigadores que aportaron a través de sus sonrisas, experiencias y sabiduría a la formación de una investigadora más. Son recuerdos que nunca se olvidarán.

Siempre estaré infinitamente agradecida con aquel hombre que con su mano fuerte y estricta educó bajo principios de nobleza y amor a sus hijas, y junto a la mujer que siempre amó construyeron las bases más sólidas de una familia para superar cualquier obstáculo.

A la más grande educadora de mi vida, que con sus constantes esfuerzos e impresionante paciencia fue dando razón a mi existir. Ella fue mostrándome poco a poco la fortaleza que se debe tener para levantarse de duros amaneceres.

A mis dos mejores amigas, mis hermanas, pues en una de ellas está el espejo en el cual me quiero reflejar por sus virtudes infinitas y en la otra encuentro enseñanzas de una persona seria pero llena de amor y compasión. Sus incondicionales apoyos me lleva a admirarlas cada día más.

A la persona que estuvo constantemente en el proceso de desarrollo de esta investigación, escucho mis quejas y alegrías de una manera incondicional. Siempre me ha demostrado lo valiosa que es su amistad.

A esos dos seres que nunca se cansan de saludarme con una explosión de alegría infinita cuando me ve, siempre entregan su absoluta fidelidad.

A esa nueva familia de personas especiales que me han adoptado en la sede de la universidad, su amabilidad, alegrías y constantes experiencias vividas han hecho de este un proceso de aprendizaje humano y lleno de valores.

Aprendí que todas las personas tienen algo que enseñarme y yo algo que aprender...

Luisa Fernanda Ruiz Jiménez

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	16
1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA NARIZ ELECTRONICA COMO DISPOSITIVO IOT.	19
1.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE OLFATO ELECTRÓNICO.	23
1.2 PROTOTIPO DE APLICACIÓN GENERAL.	24
1.2.1 Módulo de energización.	26
1.2.2 Módulo de sensado.	28
1.2.3 Módulo de adquisición de datos y comunicación.	34
1.2.4 Módulo de muestreo.	38
1.2.4.1 Fase móvil.	41
1.2.5 Prototipo final	43
2 PROCESAMIENTO DE DATOS Y APRENDIZAJE DE MÁQUINA COMO SERVICIO.	45
2.1 GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS IOT ASOCIADOS A <i>MACHINE LEARNING</i>	45
2.2 PROCESAMIENTO DE SEÑALES A PARTIR DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES.	47
2.2.1 Extracción de características.	48
2.2.2 Selección de características.	50
2.2.3 Clasificación y entrenamiento.	50
2.2.4 Validación del clasificador	52
2.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SERVICIO NARIZ ELECTRÓNICA	53
3 NARIZ ELECTRÓNICA COMO DETECTOR DE TRIATOMINOS.	57

3.1	IMPORTANCIA EPIDEMIOLÓGICA Y GENERALIDADES DE LOS TRIATOMINOS.	59
3.2	PROTOTIPO PARA APLICACIONES EN EL ÁREA DE ENTOMOLOGÍA MÉDICA.	60
3.3	CONFIGURACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE DATOS.	62
3.4	MEDIDAS DE CALIBRACIÓN.	62
3.5	PREPARACIÓN DE MUESTRAS.	65
3.6	MEDIDAS CON LAS DIFERENTES ESPECIES DE CLASE POSITIVA.	69
3.7	MEDIDAS DE CLASE NEGATIVA.	73
3.8	RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN	77
3.9	DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LA NE COMO DETECTOR DE TRIATOMINOS	80
4	CONCLUSIONES	82
	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	87

LISTA DE FIGURAS

		pág
1	Nariz electrónica de la Universidad Industrial de Santander - Versión 1.0	19
2	Desarrollo en capas de una plataforma IoT (basado en Ruiz Jiménez y cols., 2015)	21
3	Etapas de la implementación de la nariz electrónica como terminal IoT tipo dispositivo.	22
4	Proceso de funcionamiento general de una nariz electrónica. (Basado en Ruiz Jiménez y cols., 2015, Figura: Secuencia para el análisis de aromas).	23
5	Módulos básicos del funcionamiento general de una nariz electrónica como terminal móvil.	24
6	Módulos de la nariz electrónica como dispositivo IoT. A) Módulo de energización, B) Módulo DAQ, C) Módulo de sensado.	25
7	Esquemático del circuito de energización: electroválvulas y alimentación.	26
8	Esquemático del circuito de energización regulador de tensión.	27
9	Encapsulados disponibles para los sensores. a) Encapsulado cilíndrico plano de los sensores TGS. b) Encapsulado cilíndrico plano de los sensores MQ. c) Encapsulado cilíndrico esférico de los sensores TGS. d) Encapsulado cilíndrico esférico de los sensores MQ. e) Soporte base (<i>socket</i>) para los sensores TGS y MQ. f) Matriz configurable de sensores en la cámara de sensado.	30
10	Circuito de medida DC para los sensores de gas TGS y MQ.	31
11	Placa de sensado, vista inferior y ensamblado.	31
12	Tarjeta de desarrollo utilizada en el prototipo: Intel Galileo Generación1.	34
13	Esquemático del circuito de adquisición y conversión análogo-digital de las señales de los sensores.	36
14	PCB del circuito ADC señalado dentro del recuadro rojo. a) Vista superior b) Vista inferior y pistas	37
15	Esquemático del circuito de adquisición y conversión análogo-digital de las señales de los sensores.	38
16	Esquema básico de funcionamiento de sensado de la nariz electrónica usando módulo de muestreo independiente.	39
17	Cámaras de muestreo referencias RE1 (1u) – RE2 (1u) – RE3 (3u)	40
18	Células de bombeo de la Fase Móvil prototipo de la nariz electrónica como IoT.	42
19	Equipo entregable bajo la filosofía DIY (<i>Do It Yourself</i> , hágalo usted mismo) como dispositivo IoT.	43
20	Nariz electrónica de laboratorio como dispositivo IoT. Prototipo ejemplo.	44

21	Infografía del crecimiento de dispositivos conectados a internet (InShuttle, 2015).	46
22	Red de aplicaciones IoT tomado de (Evans, s.f.).	47
23	Etapas de funcionamiento del procesamiento de datos de la nariz electrónica en la nube.	48
24	Principales parámetros de una señal de sensor de gas para la extracción de características.	49
25	Proyección mediante una función en R2 a R3. (Gala García, 2013) . . .	51
26	Ejemplo de los dos casos de separabilidad: a) caso linealmente separable, b) caso no linealmente separable. (Gala García, 2013)	51
27	Ejemplo de las funciones <i>kernel</i> implementadas en el procesamiento de datos de la nariz electrónica. (Pedregosa y cols., 2011)	52
28	Funcionamiento del servicio de la nariz electrónica implementado en la plataforma IoT de RadioGis	54
29	Prototipo de nariz electrónica para identificar insectos vectores del mal de Chagas.	61
30	Interfaz web básica de usuario de la nariz electrónica como detector de triatominos.	62
31	Fórmulas estructurales de los compuestos químicos utilizados para la calibración.	63
32	Pipeta utilizada en el proceso de calibración de los sensores y compuestos químicos	64
33	Resultados del análisis de componente principales (PCA) de los datos de calibración.	66
34	Componentes de los contenedores de las colonias de triatominos del CINTROP.	67
35	Tamaños de los contenedores de las colonias de triatominos en el CINTROP.	67
36	Sensor de temperatura y humedad utilizado en la experimentación. . .	69
37	Respuesta comportamental de los triatominos durante los tratamientos. .	70
38	Respuesta en conductancia del sensor 15 ante <i>Rhodnius pallescens</i> no infectado.	70
39	Respuesta en conductancia del sensor 1 ante <i>Rhodnius pallescens</i> infectado y no infectado.	71
40	Respuesta en conductancia del sensor 11 ante <i>Triatoma dimidiata</i> y <i>Triatoma dimidiata</i> ojos rojos.	72
41	Respuesta en conductancia del sensor 5 ante <i>Rhodnius prolixus</i> y <i>Rhodnius prolixus</i> ojos rojos.	72
42	Respuesta en conductancia del sensor 9 ante <i>Eratyrus macrunatus</i> y tratamiento control.	73
43	Respuesta comportamental de los individuos de la especie <i>Aedes aegypti</i> durante el tratamiento.	74
44	Respuesta en conductancia del sensor 13 ante <i>Aedes aegypti</i> y <i>Rhodnius pallescens</i> no infectado.	74

45	Respuesta comportamental de los individuos de la especie <i>Sitophilus oryzae</i> durante el tratamiento.	75
46	Respuesta en conductancia del sensor 16 ante <i>Sitophilus oryzae</i> y <i>Rhodnius pallescens</i> no infectado.	76
47	Diferentes factores del tratamiento numero 14 correspondiente a la clase negativa.	76
48	Relación entre características extraídas de para los primeros 9 tratamientos de los sensores 1 y 11.	77
49	Imagen del software local de la nariz electrónica indicando los valores de PCA para cada sensor.	77
50	Imagen del software local de la nariz electrónica indicando los valores de PCA para la reducción de dimensionalidad.	78
51	Imagen del software local de la nariz electrónica indicando los valores de PCA para la reducción de dimensionalidad.	78
52	Imagenes bidimensionales de las primeras cuatro maquinas de soporte vectoriales entrenadas.	79
53	Detalles de las máquinas de soporte vectoriales entrenadas para clasificar los diferentes tratamientos.	80

LISTA DE TABLAS

	pág
1 Inventario de sensores de gas TGS y MQ, adquiridos en el año 2015 .	32
2 Inventario de sensores de gas TGS y MQ, adquiridos en el año 2017 .	33
3 Parámetros disponibles en el procesamiento de datos de la nariz electrónica como dispositivo IoT.	49
4 Especificaciones de la experimentación preliminar con tres diferentes especies de triatomíneos.	65
5 Descripción de los tratamientos implementados en el diseño de experimentos.	68

LISTA DE ANEXOS

	pág
ANEXO A. Glosario básico de la terminología utilizada en el libro.	81

RESUMEN

TITULO: DETECCIÓN DE LOS INSECTOS DE LA SUBFAMILIA TRIATOMINAE BASADO EN NARICES ELECTRÓNICAS. *

AUTOR: LUISA FERNANDA RUIZ JIMÉNEZ**

PALABRAS CLAVE: DETECCIÓN INSECTOS, ENFERMEDAD DE CHAGAS, ENTOMOLOGÍA, INTELIGENCIA ARTIFICIAL, INTERNET DE LAS COSAS IoT, NARIZ ELECTRÓNICA, RECONOCIMIENTO DE PATRONES, SERVICIOS TIC, SERVICIOS WEB, VECTORES DE ENFERMEDADES.

DESCRIPCIÓN:

Los insectos de la subfamilia Triatominae tienen la capacidad de transmitir el parásito *Trypanosoma cruzi*, causante de la enfermedad de Chagas. Estos insectos, como muchos otros animales, son capaces de emitir volátiles como signos inherentes a su naturaleza y el estudio de la detección de ese olor secretado resulta de gran interés para la entomología médica. Aquí proponemos que los dispositivos basados en narices electrónicas tienen la capacidad de diferenciar entre el olor generado por insectos pertenecientes a la subfamilia Triatominae de olores emanados por insectos de otro orden taxonómico. Para ello, se utilizaron cepas de ocho especies diferentes como control positivo (una de ellas con el parásito) y las especies *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) y *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) como control negativo (además de medidas de referencia). Posteriormente, se adquirió datos de sensores de diferentes gases, donde se seleccionaron y extrajeron características relevantes para implementar un sistema basado en reconocimiento de patrones. El diseño de la nariz electrónica se realizó con el fin de otorgarle la propiedad de escalabilidad y portabilidad a partir del desarrollo del hardware como terminal IoT (Internet of Things) y procesamiento de datos en la nube de forma remota. Se observó variación diferencial en la respuesta resistiva de los sensores de gas cuando se encontraban en presencia de los insectos de prueba, dicha diferenciación se extiende a nivel de género para los triatominos así como a la presencia del parásito *Trypanosoma cruzi*. Se concluye que la nariz diseñada detecta en los triatominos una huella olorífica particular, por lo tanto, se demuestra el potencial de estos dispositivos para aplicaciones en el área de entomología médica como identificadores de olores de las especies vectores de la enfermedad de Chagas.

* Trabajo de maestría.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director. PhD Homero Ortega Boada

ABSTRACT

TITLE: INSECT DETECTION OF THE TRIATOMINAE SUBFAMILY BASED ON ELECTRONIC NOSES.*

AUTHOR: LUISA FERNANDA RUIZ JIMÉNEZ**

KEYWORDS: ARTIFICIAL INTELLIGENCE, BUGS, CHAGAS DISEASE, ELECTRONIC NOSE, ENTOMOLOGY, TIC SERVICES, INSECT DETECTION, INTERNET OF THINGS IoT, RECOGNITION OF PATTERNS, VECTORS OF DISEASES, WEB SERVICES.

DESCRIPTION:

Insects of the Triatominae subfamily have the ability to transmit the parasite *Trypanosoma cruzi*, which causes Chagas disease. These insects, like many other animals, are capable of emitting volatiles as signs inherent in their nature and the study of the detection of that secreted odor is of great interest for medical entomology. Here we propose that devices based on electronic noses have the ability to differentiate between the smell generated by insects belonging to the Triatominae subfamily of odors emanated by insects of another taxonomic order. For this, strains of eight different species were used as a positive control (one of them with the parasite) and the species *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) and *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) as a negative control (in addition to reference measurements). Subsequently, sensor data from different gases was acquired, where relevant characteristics were selected and extracted to implement a system based on pattern recognition. The design of the electronic nose was made in order to give it the property of scalability and portability from the development of the hardware as an IoT (Internet of Things) terminal and data processing in the cloud remotely. Differential variation was observed in the resistive response of the gas sensors when they were in the presence of the test insects, this differentiation extends to the genus level for the triatomines as well as to the presence of the parasite *Trypanosoma cruzi*. It is concluded that the designed nose detects in the bugs a particular smelling footprint, therefore, the potential of these devices for applications in the area of medical entomology as identifiers of odors of the vector species of Chagas disease is demonstrated.

* Master Thesis.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director. PhD Homero Ortega Boada

INTRODUCCIÓN.

“Everything we love about civilization is a product of intelligence, so amplifying our human intelligence with artificial intelligence has the potential of helping civilization flourish like never before – as long as we manage to keep the technology beneficial”

Max Tegmark, President of the Future of Life Institute

Se considera que el mayor reto tecnológico de la historia es la inteligencia artificial, la cual ha generado la creación de dos tipos de pensamientos alrededor de ella, una que se preocupa por el desbordamiento y posible descontrol de ordenadores pensantes, y otra que aborda los beneficios del acompañamiento al hombre a través de pensamientos, acciones y razonamientos ejecutados por sistemas que facilitarán la vida humana (Russell, Dewey, y Tegmark, 2016). En cualquiera de las dos perspectivas, se habla de una actualidad donde objetos inertes son capaces de relacionarse con otros objetos o incluso con los humanos, con el fin de cumplir tareas cotidianas de forma eficaz y autónoma.

Hoy es posible pensar en un mundo donde la complementariedad de información de diferentes sensores sumado a grandes bases de datos, tales como reportes meteorológicos, densidades poblacionales, tasas de natalidad, tasas de mortalidad, entre otras, y analizadas en conjunto pueden ser un aporte significativo de soluciones en pro del desarrollo social, como por ejemplo prevenciones de epidemias prematuramente o detección de patrones de enfermedades. Es por ello que la importancia en la que se encuentra enmarcado este trabajo de investigación, abarca el desarrollo inicial de una plataforma creada en la Universidad Industrial de Santander (UIS) que centralice las soluciones y avances tecnológicos multidisciplinarios que se desarrollan en el país, creando poco a poco una red inteligente que involucre el Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés, *Internet of things*) y la inteligencia artificial. Para ampliar esta visión, el Grupo de Investigación interdisciplinario en Radiocomunicaciones y Sistemas de información georreferenciada (RadioGis) en conjunto con el Grupo de Investigación en Control, Electrónica, Modelado y Simulación (CEMOS) han estado uniendo esfuerzos en pro de desarrollar sistemas de olfato electrónico como propuestas de solución, transformando su clásica visión de laboratorio y convirtiéndola en un servicio itinerante.

La nitidez olfórica que proporcionan los sensores de gases de las narices electrónicas y su procesamiento de datos por medio de reconocimiento de patrones, la convierten en un dispositivo con las características ideales para ser el primer servicio con algoritmos de aprendizaje de máquina en la plataforma IoT del grupo RadioGis, con la visión de convertirse un servicio multi-usuario.

Bajo este horizonte y en primera instancia, se hace necesario realizar una re-ingeniería de la nariz electrónica como continuación de las investigaciones desarrolladas por el

grupo de investigación RadioGis (Ruiz Jiménez, Rodríguez Velásquez, y López Higuera, 2015), plasmando así, en el primer capítulo de este documento el diseño y construcción de una nariz electrónica como dispositivo IoT con propósito general, entregando información de las especificaciones técnicas y recomendaciones para el escalamiento de las funcionalidades según las aplicaciones que cada usuario requiera.

Como ya se ha comentado previamente, una de las características de las narices electrónicas se relaciona con el procesamiento de datos, el cual involucra algoritmos de inteligencia artificial que, por medio de reconocimiento de patrones, puede detectar, clasificar e identificar olores a partir de la huella digital de una muestra. En el segundo capítulo, se describe el procesamiento implementado por medio de algoritmos considerados de uso común en el área (Acevedo, 2013; Durán Acevedo, 2005; Durán, Velásquez, y Gualdron, 2012; Rojas Blanco, 2010), bajo el lenguaje de programación Python y albergado en un servidor. Finalmente se presentan las especificaciones técnicas del uso del servicio de la nariz electrónica como iniciación al proceso de inteligencia artificial como complemento al servicio itinerante.

Con el fin de evaluar el sistema de servicio de la nariz electrónica utilizando el bloque de aprendizaje de máquina, se ha decidido abarcar una nueva y desafiante aplicación que apoye a la comunidad en el ámbito social, a partir del inicio de una solución IoT que permita identificar insectos capaces de transmitir el parásito protozooario flagelado *Trypanosoma cruzi*, causante de la enfermedad Tripanosomiasis Americana, mejor conocida como la enfermedad de Chagas. Una de las problemáticas para implementar soluciones efectivas en el control de esta enfermedad y disminución de casos infectados está relacionada con la incapacidad de identificación de estos insectos por parte de los profesionales de la salud sin formación entomológica. Por ello, es pertinente preguntarse si la nariz electrónica es capaz de detectar los volátiles secretados de las glándulas exocrinas de este grupo de insectos, y diferenciarlos con respecto a otros incapaces de transmitir la enfermedad. El procedimiento llevado a cabo, los resultados y el impacto de la nariz electrónica con aplicaciones en la entomología médica se describe en el tercer capítulo, donde se presenta además, el interés de promover una nueva posible línea de investigación multidisciplinar.

Es importante que cualquier institución e investigador promueva el desarrollo de la inteligencia artificial y el Internet de las cosas de tal manera que beneficie a la humanidad en su conjunto, preservando y protegiendo el medio ambiente (Musk y Altman, 2016). En tal sentido, el objetivo principal de este trabajo de investigación consistió en implementar un algoritmo de procesamiento en la nube para una nariz electrónica mediante una técnica de reconocimiento de patrones que permita detectar diferencias clasificatorias ente los volátiles emanados por las especies pertenecientes a la subfamilia Triatominae (clase positiva) y especies de otro orden taxonómico (clase negativa).

El objetivo desarrollado durante la investigación se puede subdividir en los siguientes apartados:

1. Diseño y construcción de un prototipo de nariz electrónica con características de dispositivo IoT:

Con miras al escalamiento de la nariz electrónica como dispositivo cuyo procesamiento de datos se encuentre en la nube, se determinan características físicas fundamentales para que el hardware y el software de adquisición de datos sea aplicable como solución de diferentes problemáticas como terminal móvil.

2. Implementación de algoritmos de aprendizaje de máquina generalizados:

Este bloque de aprendizaje de máquina corresponde a la implementación de algoritmos comunes en el sistema de reconocimiento de patrones, que sin importar la procedencia de las señales a analizar, es capaz de realizar una aproximación básica a la separabilidad de características principales dadas por el usuario. Esto con el fin de inicializar el proceso de inteligencia artificial en el servidor de RadioGis.

3. Identificar diferencias clasificatorias en la respuesta de los sensores de gas en presencia de volátiles emanados por las especies pertenecientes a la sub-familia Triatominae (tratamientos de la clase positiva) y especies de otros ordenes taxonómicos que permitan realizar una clasificación:

Este apartado incluye la evaluación de los dos items anteriores, con el fin de comprobar el funcionamiento de las estrategias propuestas de la nariz electrónica como dispositivo aplicable al área de la entomología médica por medio de la detección de triatominos. Para ello se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- a) Establecer una base de datos para el sistema de reconocimiento de patrones con los registros de olor generados por los tratamientos de la clase positiva y negativa.
- b) Estudiar la separabilidad entre las dos clases, especies pertenecientes a la subfamilia Triatominae y especies de otro orden taxonómico, por medio de técnicas de selección o extracción de características.
- c) Seleccionar el método de reconocimiento de patrones que resulte más apropiado para el procesamiento de la información y la necesidad de implementarlo en la nube.
- d) Desarrollar el sistema de reconocimiento de patrones como parte de una nariz electrónica capaz de detectar el vector del mal de Chagas.

Por último, se recomienda hacer lectura previa del primer anexo del libro (ANEXO A), pues corresponde a un sencillo glosario que permitirá contextualizar los términos que se nombran a lo largo del libro. Es importante tener en cuenta que estas memorias tratan de un trabajo multidisciplinario, que ha reunido a ingenieros electrónicos, biólogos y químicos, y es posible que existan palabras homónimas que generen confusión.

1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA NARIZ ELECTRONICA COMO DISPOSITIVO IOT.

En la Universidad Industrial de Santander (UIS) existe una nariz electrónica basada en resultados de investigación previas (Ruiz Jiménez y cols., 2015; Arenas, 2016; Conde y Rangel, 2015). Esta nariz consiste en una caja de acrílico en donde se almacena una matriz de sensores de gases químicos, otro compartimiento donde es acumulado el volátil que se desea identificar, un sistema neumático conformado por electroválvulas y bomba de aire; y por último la etapa de adquisición y control del sistema, como se observa en la figura 1.

Figura 1. Nariz electrónica de la Universidad Industrial de Santander - Versión 1.0



Sin embargo el objetivo de este proyecto y la orientación que el grupo de investigación RadioGis de la UIS le ha querido dar a la nariz electrónica actual es convertirla en un dispositivo IoT para superar diferentes limitaciones que presenta el sistema original tales como el costo, peso, tamaño y desempeño. Al independizar la terminal de sensores del procesamiento de datos, permite al usuario contar sólo con la tecnología de sensado que es liviana, portable y tiene la capacidad de transmitir la información necesaria hacia una central remota (la nube) donde se realiza el procesamiento de datos y es capaz de realimentarse; así se obtiene una solución que masificaría el uso de la nariz, su aplicabilidad en el mercado y específicamente nuestro caso, la identificación de los vectores de mal de Chagas.

Para convertir esta nariz electrónica en un servicio IoT que en un futuro sea capaz de prestar un servicio TIC completo, y que apoye a la comunidad en el ámbito social permitiendo identificar la presencia de los vectores del mal de Chagas, es necesario completar preliminarmente las fases que implican el desarrollo de dichas soluciones: “El CentroTIC utiliza una representación en capas para exponer la conformación

de las IoT, basándose en modelos conocidos como el de las NGN (next generation net-works) y las IMT (International Mobile Telecommunication), reuniendo en detalle los componentes que interceden en la realidad del servicio. Este modelo integrador (...) permite que todos los actores que se relacionan con el sistema encuentren rápidamente su rol dentro de la industria, reconociendo sus habilidades y aportes” (Bliznakoff, 2014). El modelo consta de seis capas conectadas entre sí por orden ascendente: sociedad, tecnologías del usuario, acceso al medio, conectividad, cómputo en la nube ó *cloud computing* y aplicaciones como se puede observar en la figura 2.

En la capa de sociedad como base primordial del desarrollo de la solución, se encuentra principalmente el grupo CINTROP y a partir de ellos están todos los contactos y agentes interesados en los avances investigativos del proyecto. A continuación, esta capa de sociedad interactúa con la capa de tecnologías del usuario que corresponde con el hardware de la nariz electrónica (fases químicas y electrónicas), el cual ha sido desarrollado por estudiantes del grupo y se encuentra en modo funcional. Este hardware tiene acceso al medio (siguiente capa) con una tarjeta de adquisición de datos capaz de conectarse a internet (capa de conectividad) por medio de Ethernet o redes móviles. La capa de aplicaciones se desarrolla como complemento al servicio y se encuentra orientado hacia los servicios web y diseños basados en la visión del cliente. Por último, para completar el modelo de capas de las plataformas IoT definido por el CentroTIC se debe realizar la capa de cómputo en la nube la cual depende de la orientación funcional al que se le desee dar al dispositivo, en nuestro caso: la nariz electrónica para la detección del vector del mal de Chagas.

En conclusión, una terminal IoT resume la capa de tecnologías del usuario, la capa de acceso al medio y la capa de conectividad. Por lo tanto, la terminal de la nariz electrónica se encuentra constituida por cuatro etapas como se muestran en la figura 3. En primera instancia, los sensores presentan un flujo de información ascendente hacia la interfaz de comunicación, los cuales envían las señales a través del controlador de adquisición y del sistema embebido de alta precisión (en el caso de implementación se ha utilizado la tarjeta de desarrollo Intel Galileo). En dicha tarjeta se encuentra almacenado los algoritmos de preprocesamiento y comunicación que consume determinado servicio web. Finalmente, la terminal IoT es capaz de conectarse a la red donde se encuentra el procesamiento de datos, el cual genera un flujo de datos descendente hacia los actuadores de la nariz, como por ejemplo, los controles de la apertura y cierre de las electroválvulas.

Se presenta a continuación una breve descripción de los sistemas de olfato electrónico con el fin de contextualizar el uso de estas tecnologías. Posteriormente, en la sección ‘prototipo de aplicación general’, se detalla cada uno de los componentes de la terminal móvil a partir de la conformación descrita.

Figura 2. Desarrollo en capas de una plataforma IoT (basado en Ruiz Jiménez y cols., 2015)

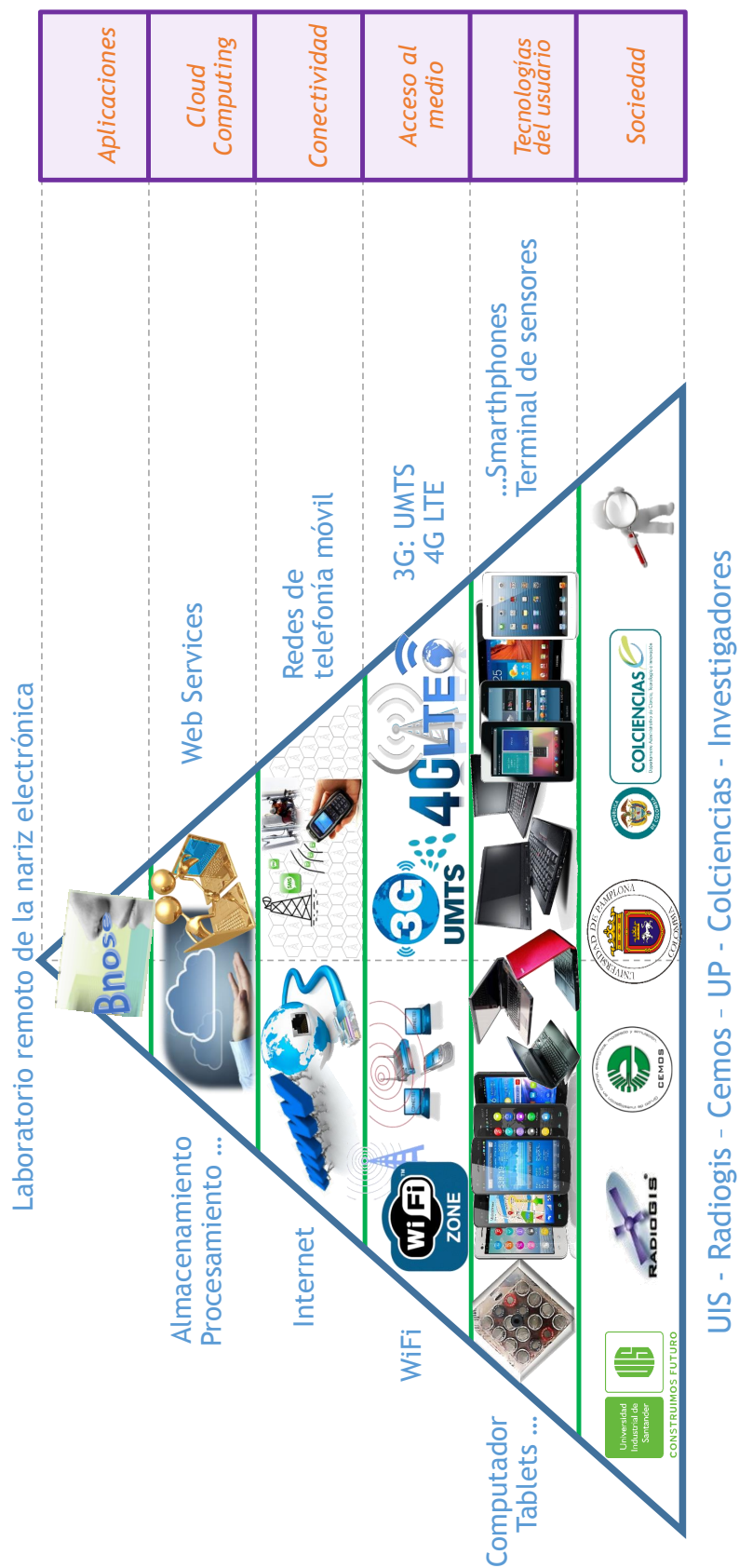
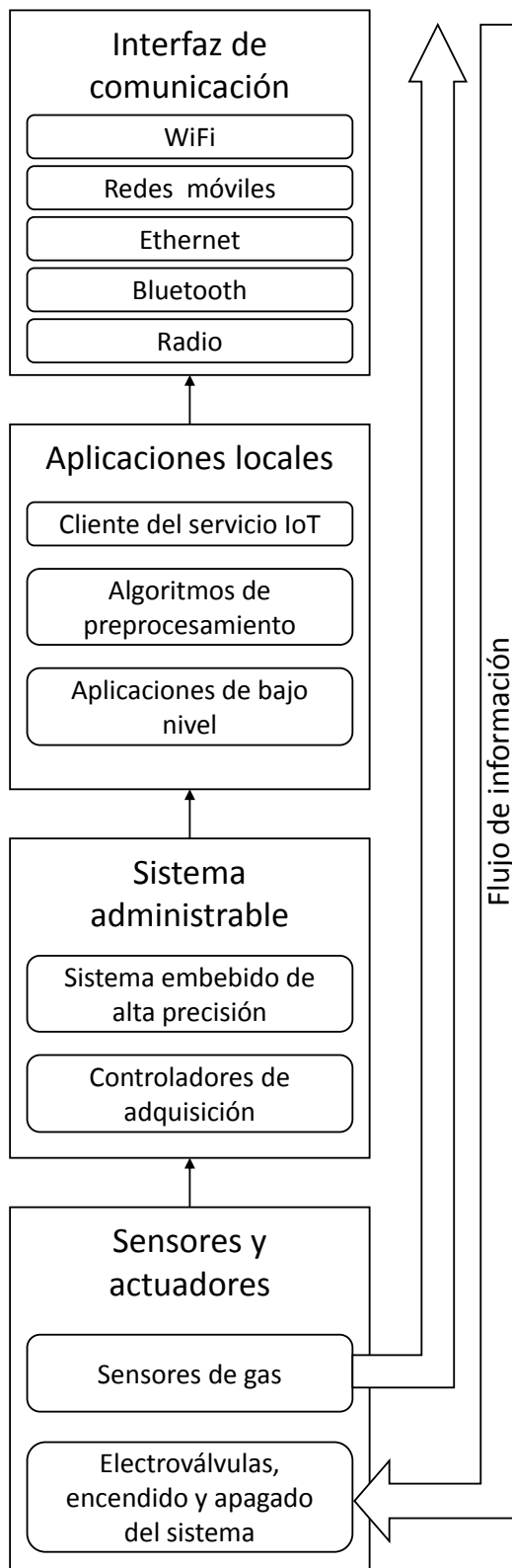


Figura 3. Etapas de la implementación de la nariz electrónica como terminal IoT tipo dispositivo.



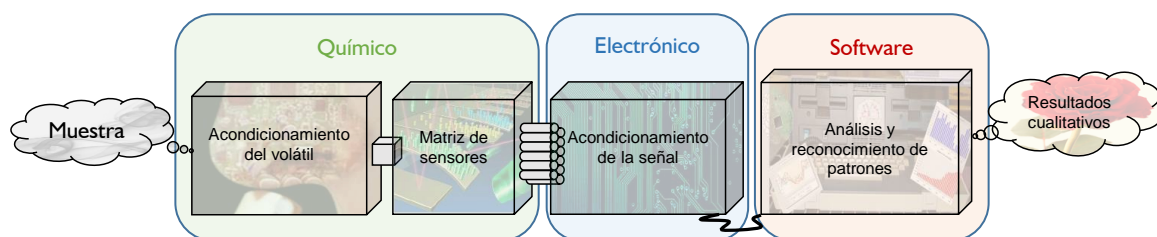
1.1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE OLFATO ELECTRÓNICO.

La nariz electrónica es un dispositivo compuesto de sensores de gas sensibles a ciertos compuestos específicos según su configuración acoplado a un sistema de reconocimiento de patrones como método para procesar los datos resultantes de algún experimento (Iveth Moreno Rony Caballero, 2009).

Las etapas del proceso de reconocimiento son similares al olfato biológico y se llevan a cabo para la identificación, comparación, cuantificación y otras aplicaciones, incluido el almacenamiento y recuperación de datos (Durán Acevedo, Gualdron Guerrero, y Hernández Ordoñez, 2014). Sin embargo, la evaluación hedónica es una especificidad de la nariz humana dado que está relacionada con opiniones subjetivas. Estos dispositivos han experimentado un gran desarrollo y ahora se utilizan para suplir necesidades industriales. La definición más comúnmente aceptada de lo que es un sistema de olfato electrónico es la que lo describe como “un instrumento que comprende una matriz de sensores químicos con sensibilidades solapadas y un avanzado sistema de reconocimiento de patrones, capaz de reconocer aromas simples y/o complejos (Iveth Moreno Rony Caballero, 2009)”.

En resumen, ésta tecnología se encuentra constituido por tres fases importantes como se muestra en la figura 4. El proceso químico inicia cuando la muestra odorífica es acondicionada para permitir su paso hacia una matriz de sensores de gas, que al ser resistivos el conjunto de electrodos del cual están compuestos cambian de tamaño alterando su impedancia. Este suceso origina señales que pasan por la etapa de acondicionamiento y procesamiento de selección de datos implementado en una etapa electrónica que entrega la huella digital del compuesto a la fase de reconocimiento de patrones que permite detectar, clasificar e identificar la muestra.

Figura 4. Proceso de funcionamiento general de una nariz electrónica. (Basado en Ruiz Jiménez y cols., 2015, Figura: Secuencia para el análisis de aromas).



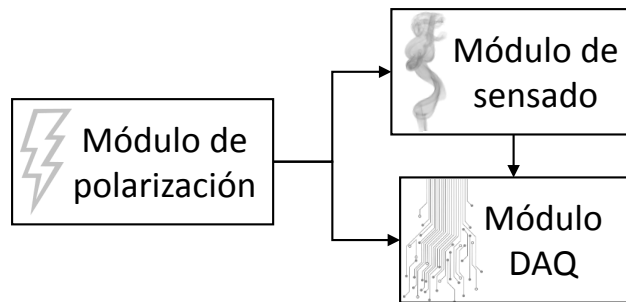
El sistema olfativo electrónico se diferencia de los sistemas de instrumentación químicos tradicionales como los cromatógrafos de gases en la forma en que se analizan los datos. La nariz electrónica no realiza una identificación particular de las moléculas presentes en el volátiles, por el contrario, determina una huella a partir del procesamiento de datos en conjunto (Jesus Brezmes, 2002).

En la actualidad las narices electrónicas no son solamente usadas para clasificaciones de aroma, sino también para la detección de olores. De ahí que su importancia y utilización se haya extendido a aplicaciones en la agroindustria, medio ambiente, la seguridad, y la medicina (Paulsson, Larson, y Winqvist, 2000; Adechy, Shiers, Rossel, y L, 1998). En particular en el campo ambiental ha habido diferentes trabajos científicos enfocados al monitoreo de gases contaminantes presentes en el aire como en el agua.

1.2. PROTOTIPO DE APLICACIÓN GENERAL.

Para desarrollar un sistema basado en narices electrónicas que sea capaz de adaptarse a diferentes aplicaciones de forma genérica, es necesario establecer los módulos indispensables para su correcto funcionamiento. De forma independiente al sistema de procesamiento de datos, una nariz electrónica se conforma de un módulo de energización, módulo de sensado y un módulo de acondicionamiento y adquisición de señales, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Módulos básicos del funcionamiento general de una nariz electrónica como terminal móvil.



El módulo de energización, como su nombre lo indica, es el encargado de realizar la energización de los demás módulos teniendo en cuenta la potencia y la regulación de tensión que estos solicitan. Por otro lado, en el módulo de sensado se encuentra la matriz de *sockets* para sensores de tipo encapsulado de 6 pines totalmente configurable, puesto a que se puede conectar los sensores necesarios para la aplicación en prueba. Finalmente, el módulo de acondicionamiento y adquisición de señales, básicamente consiste en el proceso de medir por medio de una interfaz física las variaciones que los sensores presentan ante los volátiles a medir, según la configuración que la tarjeta de adquisición presente, es posible conectar directamente las señales de los sensores a los puertos analógicos, o hacer uso de la tarjeta de digitalización (ADC por sus siglas en inglés *analog-to-digital converter* y conectar las señales a través de los puertos digitales. Es importante aclarar que esta tarjeta de adquisición debe tener la capacidad de conectarse a Internet, ya sea por *Ethernet*, redes móviles, entre otros.

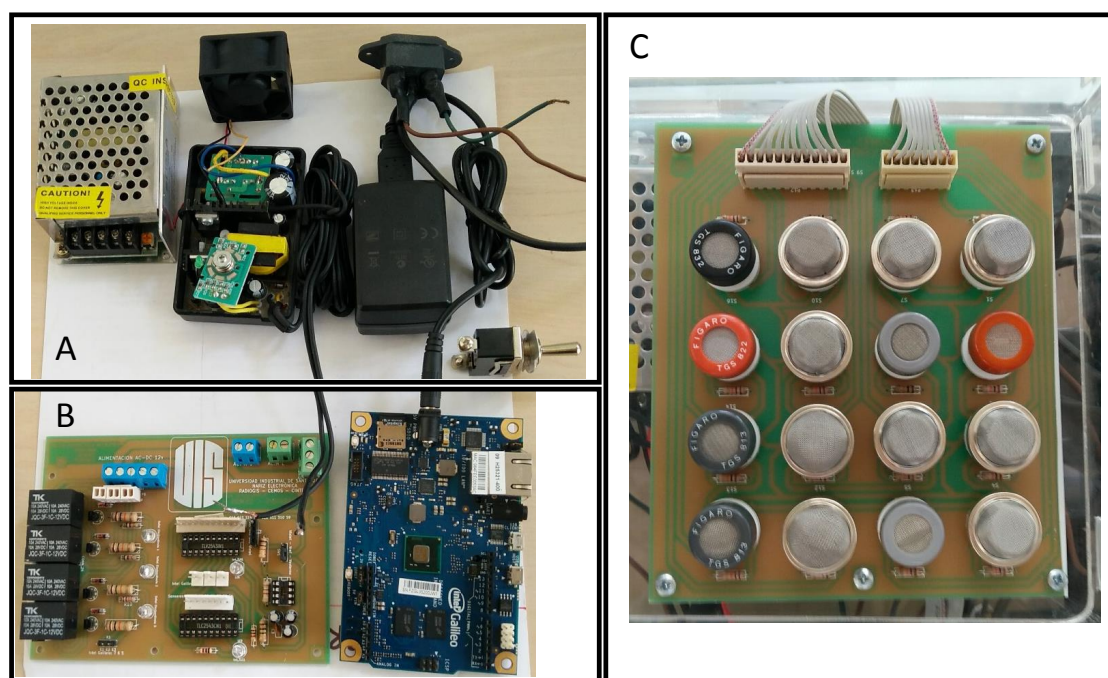
Adicionalmente, en un sistema de olfato electrónico es común encontrar el módulo de muestreo, pues permite optimizar en algunas aplicaciones el proceso de medi-

da. Este módulo se encarga, transcurrido un intervalo de tiempo, de concentrar en un recipiente la mayor cantidad de volátiles posibles a medir para posteriormente inducir el estado de oxidación/reducción en los sensores ya sea por medio de una jeringa (prototipo de inyección) o utilizando una fase móvil (flujo continuo). Como se mostrará más adelante, en el prototipo genérico acondicionado para el área de entomología, esta fase se fusiona con el módulo de sensado.

La interrelación entre estos tres módulos constituye el hardware prototipo de la nariz electrónica como dispositivo IoT, puesto a que presenta las características de portabilidad, replicabilidad, conectividad a internet y la capacidad de relacionarse con otras narices electrónicas a través del procesamiento de datos en la nube.

Es importante aclarar que estos módulos pueden estar dentro de un armazón adecuado según la aplicación que se requiera, es decir, si el interés es adquirir datos atmosféricos sobre un área específica a través de un dron, solo hace falta conectar los tres módulos en una posición que permita tanto exponer los sensores a la mayor cantidad de volátiles posibles y al mismo tiempo estar protegidos de cualquier daño. Pero si por ejemplo, se desea realizar el sensado de aromas de frutas, es necesario diseñar un armazón que adquiera los volátiles en un recipiente sellado y a continuación utilizar el módulo de muestreo para desplazarlos hacia la cámara de sensores. Es por esto que la nariz electrónica como terminal móvil consta de los tres módulos nombrados anteriormente como se muestra en la figura 6, y que se explicarán a continuación de forma detallada.

Figura 6. Módulos de la nariz electrónica como dispositivo IoT. A) Módulo de energización, B) Módulo DAQ, C) Módulo de sensado.

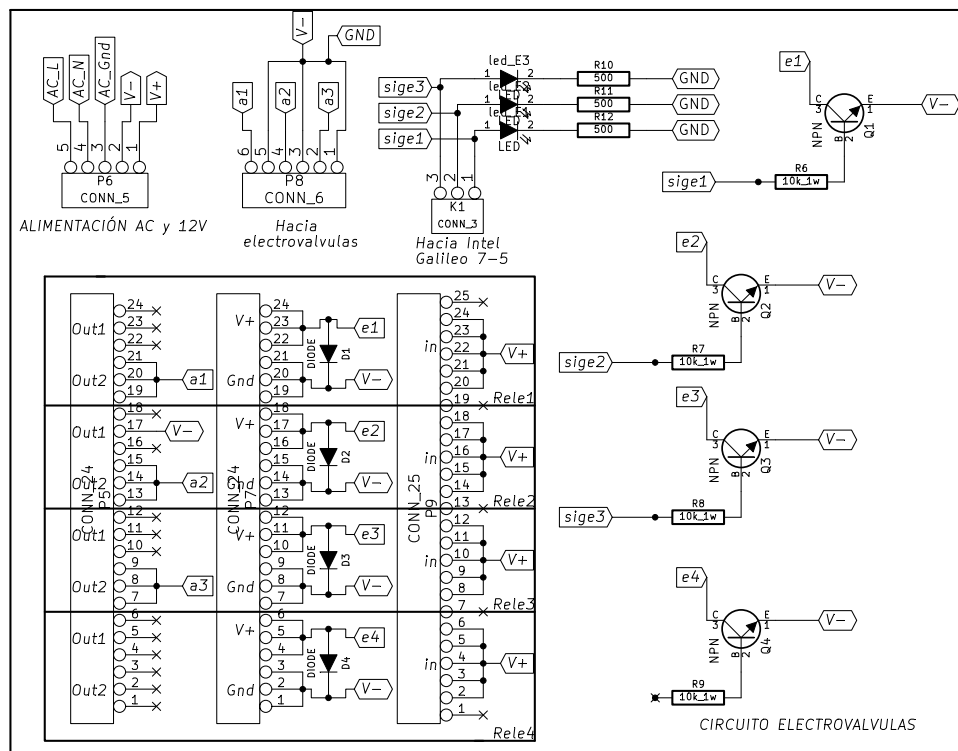


1.2.1. Módulo de energización. El módulo de energización tiene dos configuraciones que dependen de la existencia independiente del módulo de muestreo. Cuando es necesario el uso de electroválvulas para realizar el control del flujo continuo de la fase móvil, el módulo de energización alimenta una fuente de tensión adicional de 12Vdc. En este caso, el prototipo se encuentra diseñado para utilizar 3 electroválvulas de referencia PDP01021 de la marca A.R.P de 12VDC 7.0W 2/2way y presión de 0100psi, acopladas al sistema de control (tarjeta de desarrollo) por medio de un circuito compuesto de relés que traducen la señal de control binaria de 0 a 5v en señal on/off de 0 a 12v.

Por otra parte, el módulo de energización cuenta con una fuente de tensión de 5v que alimenta tanto la tarjeta de desarrollo como a los pines *heater* de los sensores (Vh). Es importante tener en cuenta que esta tensión debe tener un nivel de ondulación mínima (máxima regulación posible), puesto a que la respuesta de los sensores tienen alta dependencia a la tensión Vh.

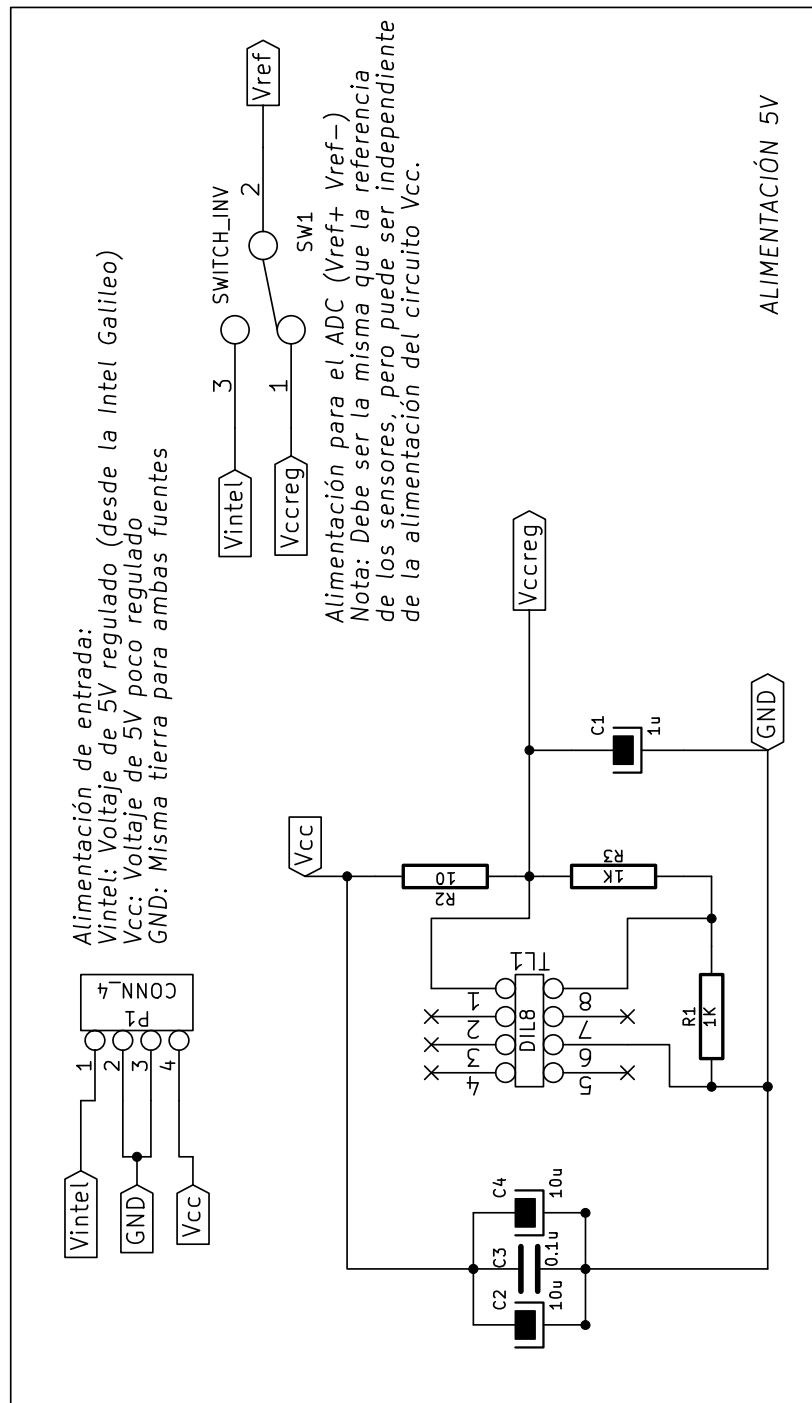
En conclusión, el módulo de energización cuenta con una bornera de tres pines, como se puede observar en el esquemático, ver figura 7, para la conexión al tomacorriente de 110Vac, la cual se conecta a la fuente de tensión de 12v, cuyas salidas se referencian con los nombres 'V+' y 'V-'. Las salidas de control *on/off* que van hacia las electroválvulas se referencian con los nombres 'a1', 'a2' y 'a3', y las señales de control *on/off* de la tarjeta de desarrollo se referencian con el nombre 'sig1', 'sig2' y 'sig3'. Con motivos de desarrollo, se dispone de una salida regulada de control adicional a través del 'relé4'.

Figura 7. Esquemático del circuito de energización: electroválvulas y alimentación.



Adicionalmente el circuito de energización cuenta con un sencillo sistema de protección ante conexiones irregulares para los sensores, el esquemático se puede observar en la figura 8. Esta fase se implementó con un circuito integrado de referencia TL431BIP de la casa de *Texas Instrument*, y regula la tensión de salida del módulo de energización.

Figura 8. Esquemático del circuito de energización regulador de tensión.



1.2.2. Módulo de sensado. Como se ha nombrado anteriormente, la ciencia de una nariz electrónica consiste en la respuesta del fenómeno químico existente entre las moléculas que componen el volátil que se desea identificar y las moléculas de un material referencia. Este proceso perteneciente a la fase química sucede gracias a los sensores de gas. Así que, los sensores de gas son dispositivos que indican la presencia de algún gas y en algunos casos, son capaces de medir la concentración de dicho gas.

En la actualidad existen en el mercado un gran número de variantes de sensores de gas, que dependen de su tamaño, sensibilidad, aplicaciones y tecnología utilizada; sin embargo, se pueden diferenciar dos clases según su modo de operación: En el primero, se hace necesario el contacto entre el gas y el material del sensor, y el segundo, se hace su medición a través del uso de emisiones infrarrojas o ultrasónicas. En general, los sensores catalíticos e infrarrojos se utilizan para la detección de gases combustibles, y los sensores electroquímicos y de semiconductores de óxido metal (MOS -metal oxide semiconductor-) para la detección de gases tóxicos.

El prototipo construido, cuenta con sensores semiconductores de óxido de metal, el cual funciona con una película compuesta por cristales de óxido-metal tipo n, en este caso, dióxido de estaño (SnO_2). En estos sensores, la reacción química ocurre cuando el gas hace contacto con el sensor provocando que la resistencia eléctrica en el sensor decrezca.

En los sensores que usan el dióxido de estaño, la sensibilidad para diferentes gases varía con la temperatura, por lo que hay un filamento que se calienta por medio de una corriente eléctrica. Cuando un cristal de óxido metálico como SnO_2 aumenta su temperatura, el oxígeno del aire es absorbido en la superficie del cristal con una carga negativa. Posteriormente, los electrones donantes en la superficie del cristal se transfieren al oxígeno absorbido y se tiene una mayor carga positiva, lo que significa el aumento de la barrera de potencial al igual que resistencia eléctrica del material. En presencia de un gas desoxidante, la densidad superficial del oxígeno cargado negativamente disminuye, al igual que la barrera de potencial, y por tanto la conductancia del material aumenta. Estas variaciones responden a la concentración de gas a través de la ecuación 1, donde R_s es la resistencia del sensor, A y α son constantes y C la concentración del gas (Figaro, 2005).

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

Una de las principales características de los sensores de gas tipo MOS es su capacidad para detectar bajas concentraciones de gases. Además, existe la posibilidad de suministrar sensores para una amplia variedad de gases modificando los materiales del sensor durante la fabricación sin dejar de ser más asequibles para el público en general. No obstante, es importante tener en cuenta que:

1. Estos sensores presentan alta dependencia a las variaciones de presión atmosférica. Típicamente, esta dependencia responde de forma lineal.

2. Según la ecuación 1, la respuesta en resistencia del sensor ante diferentes concentraciones de un gas desoxidante, es aproximadamente lineal en una escala logarítmica.
3. La respuesta del sensor ante un gas desoxidante normalmente se da en menos de un minuto, al igual que su recuperación a ‘estado estable’, sin embargo, la velocidad de respuesta y reversibilidad variará de acuerdo al modelo del sensor y el gas en medición.
4. Es normal que los sensores presenten un decaimiento rápido de la resistencia cuando se activa después de un tiempo de almacenamiento des-energizado, este tiempo se denomina ‘Acción inicial’.
5. Para el correcto funcionamiento del sensor es necesario el calentamiento del filamento capaz de activar el material semiconductor, por tanto, existe una dependencia a la temperatura ambiente y los niveles de humedad los cuales afectan el valor de resistencia medida. Se puede utilizar un circuito de compensación adicional para los sensores y la corrección de medida.
6. Dicho filamento se calienta a través de la corriente que pasa entre los pines de *heater* del sensor, es por ello que esta tensión ha de ser lo más regulada posible, pues su variabilidad afecta la lectura de resistencia.
7. Antes de ser usados por primera vez, los sensores deben pasar por la etapa de *preheating time*, es decir, mantener los sensores en funcionamiento continuo durante al menos una semana (entre mayor sea el tiempo de almacenamiento, mayor deberá ser el *preheating time*) sin estar expuestos a ningún contaminante, esto con el fin de que alcancen un nivel de conductancia estable y por tanto, eliminar cualquier impureza que pudiese haber adquirido durante el proceso de almacenamiento.
8. En general, los sensores presentan características estables a lo largo del tiempo, lo que los hace ideales para esta aplicación puesto a que conlleva un funcionamiento sin mantenimiento.
9. Finalmente, se recomienda evitar exponer los sensores a gases de silicona, ambientes corrosivos, contaminación por metales alcalinos, contacto con el agua, congelación, aplicación de voltaje excesivo, gases de alta densidad, excesivas temperaturas o niveles de humedad, vibraciones, choques, soldaduras y otras variaciones que lo puedan afectar.

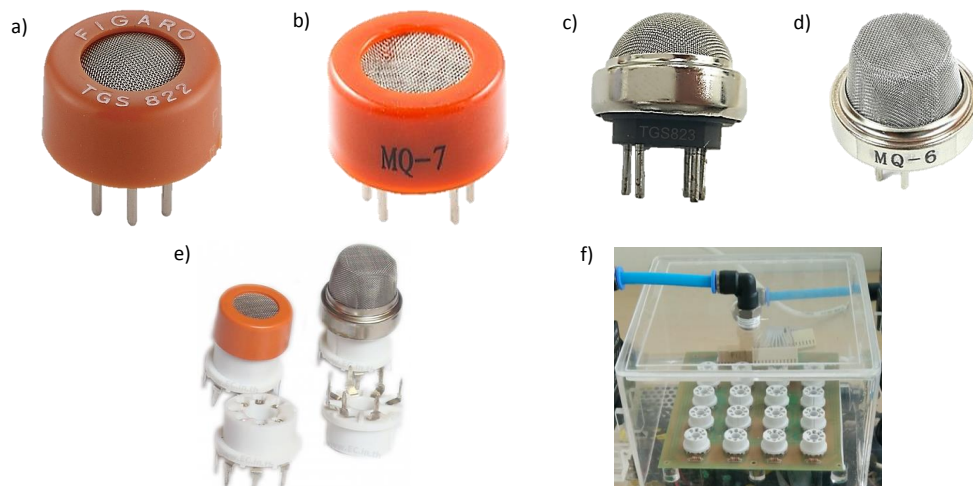
Estos sensores tienen aplicaciones orientadas a la medición de la calidad de aire y de uso común para la detección de hidrocarburos o gases tóxicos. Por ejemplo, según la empresa estadounidense ‘SensoVant’, que son distribuidores de instrumentación electrónica especializada y amigable con el medio ambiente, define que los usos más comunes de sus sensores de gas son ‘Redes de medición de calidad del aire urbano, automatización inteligente de edificios (control de ventilación), monitorización de fuentes y focos de emisión de contaminantes, control de emisiones en entornos industriales, aplicaciones de investigación y proyectos públicos, redes de calidad del

aire con energía solar, carretera y monitoreo de túneles (Monitorización de tráfico y redes ferroviarias), monitorización en: invernaderos, cámaras de conservación, granjas y establos, incubadoras, vehículos de transporte. (...) Equipos destinados a la monitorización de la calidad del aire en entornos urbanos y gases contaminantes en automatización de edificios (control de ventilación), emisiones en carreteras, monitorización de fuentes y focos de emisión de contaminantes en entornos industriales, etc.’ (sensing Sensovant, 2014).

Los sensores de gas que se utilizaron en este modelo de nariz electrónica son los presentados en la figura 9 pertenecientes a la casa de fabricantes *Figaro Engineering* (imágenes a y c – referencia TGS) y *Hanwai Electronics* (imágenes b y d – referencia MQ). Se han adquirido dos tipos de encapsulamiento los cuales dependen del modelo del sensor, está el encapsulado cilíndrico plano (imágenes a y b) y cilíndrico esférico (imágenes c y d). Para cualquiera de los modelos de los sensores, se implementaron los *sockets* tipo “Sr2”.

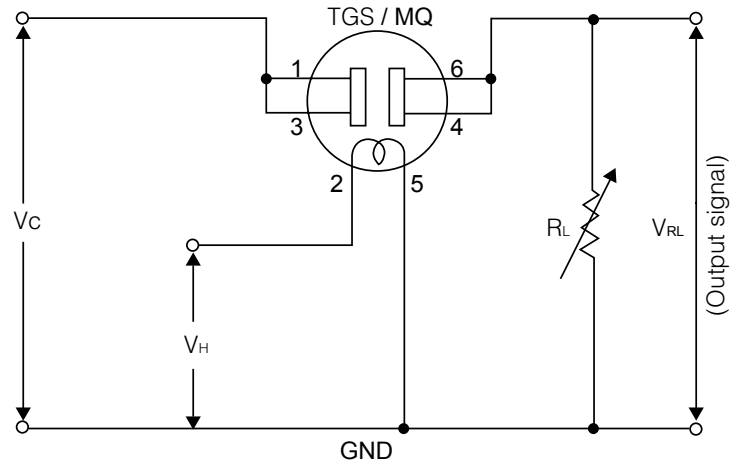
Con las experiencias adquiridas durante las investigaciones anteriores, se desarrolla la placa de sensado teniendo en cuenta la capacidad de ser fácilmente reconfigurable, es decir, se pueden cambiar de forma sencilla los sensores que constituyen la matriz de la nariz electrónica. Esta matriz tiene la capacidad de albergar 16 sensores en una cuadrícula de 4x4, como se observa en la imagen f de la figura 9. Estas se encuentran instaladas en una cámara de acrílico de 8cm de alto por 16cm de largo y 14.5 cm de ancho, es decir, un volumen de 1.856lt, con una tapa que sella cualquier entrada o salida de muestras al momento de almacenar el dispositivo. Esta tapa también sirve como puente para el momento de utilizar el modelo con cámara de muestreo y flujo másico.

Figura 9. Encapsulados disponibles para los sensores. a) Encapsulado cilíndrico plano de los sensores TGS. b) Encapsulado cilíndrico plano de los sensores MQ. c) Encapsulado cilíndrico esférico de los sensores TGS. d) Encapsulado cilíndrico esférico de los sensores MQ. e) Soporte base (*socket*) para los sensores TGS y MQ. f) Matriz configurable de sensores en la cámara de sensado.



El circuito empleado para el acondicionamiento de la señal de los sensores ha sido el sugerido por el fabricante, figura 10, donde se realiza una medida indirecta de la resistencia que responde a la ecuación 2, donde R_s es la resistencia del sensor, V_c es el voltaje de control (5v), R_l es la resistencia de carga ($4.7k\Omega$), V_{rl} es la tensión que se mide entre los terminales de R_l . Esta tensión es la señal que posteriormente será digitalizada y enviada hacia la tarjeta de desarrollo.

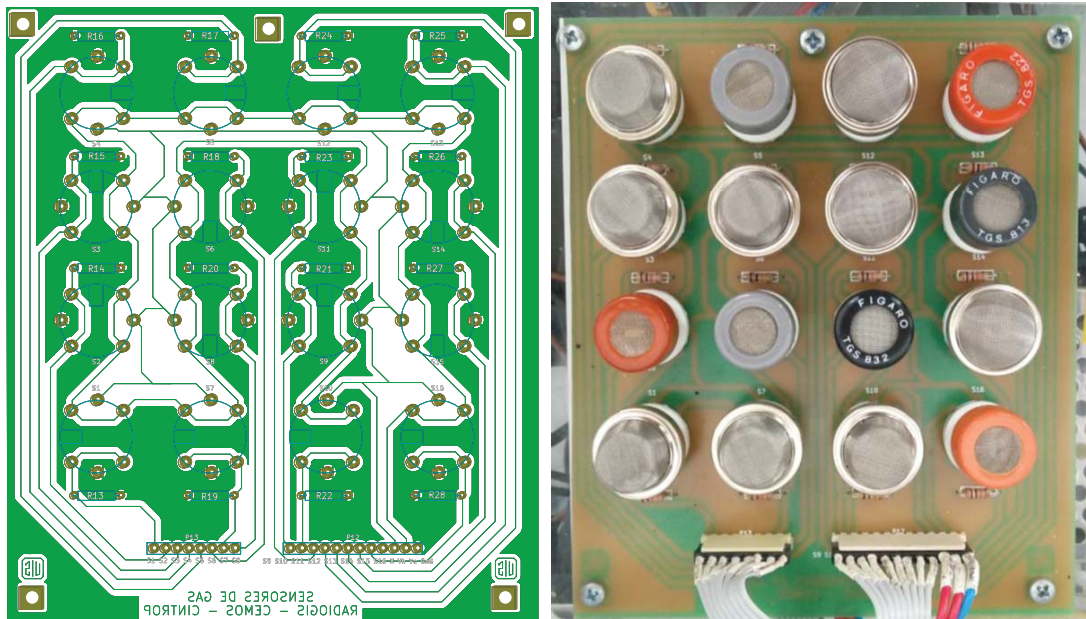
Figura 10. Circuito de medida DC para los sensores de gas TGS y MQ.



$$R_s = (V_c * R_l) / (V_{rl} - R_l) \quad (2)$$

Se diseñó una placa de tamaño 11.5cmX13.5cm de una capa y dos borneras de salida para las señales de los sensores y alimentación. En la figura 11 se puede observar a la izquierda la huella PCB y en la derecha la matriz de sensores instalados.

Figura 11. Placa de sensado, vista inferior y ensamblado.



Actualmente, se cuenta con un kit de 31 sensores donde 15 son del a casa *Figaro Engineering* y 16 de la casa fabricante *Hanwai Electronics*. En la tabla 1 y tabla 2 se pueden observar la fecha de adquisición de dichos sensores; si se encuentra en uso o almacenado; si es el caso que se encuentra en uso, la posición en la PCB que ocupa; el nombre referencia del sensor, la marca de dicho sensor; el modelo al que corresponde; los gases al que es más sensible y en general el área de uso común de dicho sensor.

Tabla 1. Inventario de sensores de gas TGS y MQ, adquiridos en el año 2015

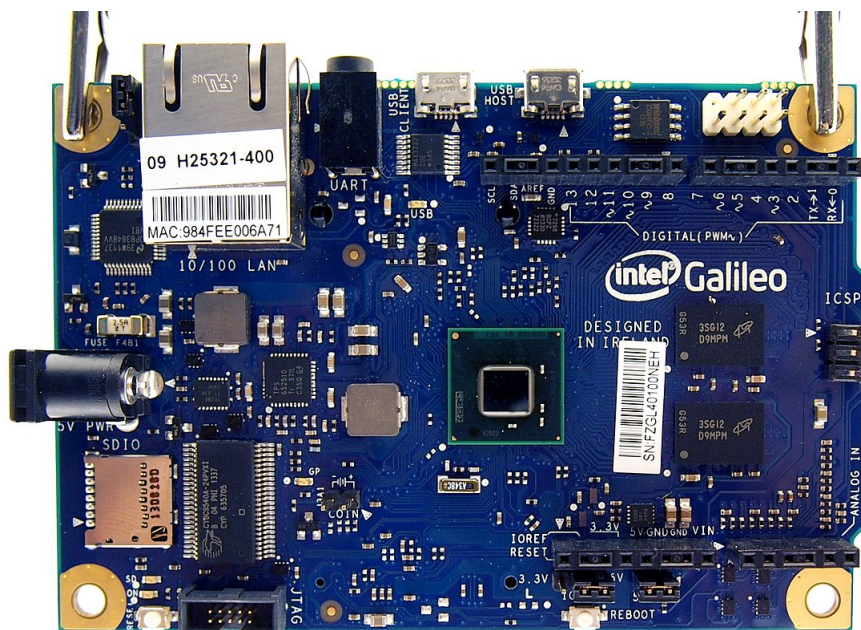
Año - mes adquisición	UBICACIÓN	POSICIÓN EN LA PCB	NOMBRE REF DEL SENSOR	MARCA	REFERENCIA	GASES DETECCIÓN	ÁREA DE USO COMÚN
2015	ALMACENADO	N/A	S001	FIGARO	TGS-826	Amoniaco, butano, etanol, hidrogeno.	Detección de amoniaco.
	ALMACENADO	N/A	S002	FIGARO	TGS-822	Metano, butano, alcohol, etanol, hexano, CO, benceno, acetona.	Industria, detección de solventes y vapores.
	ALMACENADO	N/A	S003	FIGARO	TGS-813	Metano, butano, alcohol, propano, hidrogeno, CO.	Gases en general, calidad del aire.
	ALMACENADO	N/A	S004	FIGARO	TGS-832	Etanol, R-22, R-134a, R-410a, R-404a, R-407c.	Detección de gases refrigerantes.
	ALMACENADO	N/A	S005	FIGARO	TGS-821	Hidrogeno, metano, etanol, CO.	Detección de Hidrogeno.
	ALMACENADO	N/A	S006	HANWEI	MQ-9	Metano, LPG, CO.	Hidrocarburos, industria.
	ALMACENADO	N/A	S007	HANWEI	MQ-2	Metano, butano, LPG, smoke, alcohol, propano, hidrogeno, CO.	Industria, hidrocarburos.
	ALMACENADO	N/A	S008	FIGARO	TGS-813	Metano, butano, alcohol, propano, hidrogeno, CO.	Gases en general, calidad del aire.
	ALMACENADO	N/A	S009	HANWEI	MQ-4	Metano, LPG, smoke, alcohol, propano, CO.	Industria, hidrocarburos.
	ALMACENADO	N/A	S010	HANWEI	MQ-7	Metano, LPG, alcohol, etanol, hidrogeno, CO.	Industria, detección de CO.
	ALMACENADO	N/A	S011	HANWEI	MQ-135	Metano, smoke, alcohol, etanol, amoniaco, CO, CO2, benceno	Control de calidad del aire.
	USO	S10	S012	HANWEI	MQ-6	Metano, butano, LPG, smoke, alcohol, etanol, propano, hidrogeno, CO.	Industria, hidrocarburos, control de calidad del aire.
	ALMACENADO	N/A	S013	HANWEI	MQ-3	Metano, LPG, smoke, alcohol, etanol, hexano, CO.	Detección de alcohol y solventes.

Tabla 2. Inventario de sensores de gas TGS y MQ, adquiridos en el año 2017

Año - mes adquisición	UBICACIÓN	POSICION EN LA PCB	NOMBRE REF DEL SENSOR	MARCA	REFERENCIA	GASES DETECCIÓN	ÁREA DE USO COMÚN	
Mayo de 2017	USO	S01	S014	HANWEI	MQ-2	Metano, butano, LPG, smoke, alcohol, propano, hidrogeno, CO.	Industria, hidrocarburos.	
	USO	S02	S015	HANWEI	MQ-3	Metano, LPG, smoke, alcohol, etanol, hexano, CO.	Detección de alcohol y solventes.	
	USO	S03	S016	HANWEI	MQ-4	Metano, LPG, smoke, alcohol, propano, CO.	Industria, hidrocarburos.	
	USO	S04	S017	HANWEI	MQ-6	Metano, butano, LPG, smoke, alcohol, etanol, propano, hidrogeno, CO.	Industria, hidrocarburos, control de calidad del aire.	
	USO	S05	S018	HANWEI	MQ-7	Metano, LPG, alcohol, etanol, hidrogeno, CO.	Industria, detección de CO.	
	USO	S06	S019	HANWEI	MQ-8	Hidrogeno, metano, etanol, CO.	Hidrogeno (H2), evita el ruido por alcohol y <i>cooking fumes</i> , LPG, CO	
	USO	S08	S020	HANWEI	MQ-9	Metano, LPG, CO.	Hidrocarburos, industria.	
	USO	S07	S021	HANWEI	MQ-135	Metano, smoke, alcohol, etanol, amoniaco, CO, CO2, benceno	Control de calidad del aire.	
	Agosto de 2017	USO	S12	S022	FIGARO	TGS-816	Metano, propano, butano, gas natural, LPG	Detección de fugas de gas, industrial
		ALMACENADO	N/A	S023	FIGARO	TGS-816	Metano, propano, butano, gas natural, LPG	Detección de fugas de gas, industrial
USO		S11	S024	FIGARO	TGS-823	Vapores de solventes orgánicos como el etanol	Detección de alcohol y solventes.	
ALMACENADO		N/A	S025	FIGARO	TGS-823	Vapores de solventes orgánicos como el etanol	Detección de alcohol y solventes.	
USO		S09	S026	FIGARO	TGS-832	Etanol, R-22, R-134a, R-410a, R-404a, R-407c.	Detección de gases refrigerantes.	
ALMACENADO		N/A	S027	FIGARO	TGS-832	Etanol, R-22, R-134a, R-410a, R-404a, R-407c.	Detección de gases refrigerantes.	
USO		S13	S028	FIGARO	TGS-822	Metano, butano, alcohol, etanol, hexano, CO, benceno, acetona.	Industria, detección de solventes y vapores.	
USO		S14	S029	FIGARO	TGS-813	Metano, butano, alcohol, propano, hidrogeno, CO.	Gases en general, calidad del aire.	
USO		S15	S030	FIGARO	TGS-826	Amoniaco, butano, etanol, hidrogeno.	Detección de amoniaco.	
USO		S16	S031	HANWEI	MQ-3	Metano, LPG, smoke, alcohol, etanol, hexano, CO.	Detección de alcohol y solventes.	

1.2.3. Módulo de adquisición de datos y comunicación. Finalmente, uno de los módulos básicos que conforman a la nariz electrónica, es el módulo de adquisición y comunicación. La implementación de esta fase en el prototipo se realizó a través de la tarjeta de desarrollo Intel Galileo Generación 1, figura 12. Esta tarjeta es la primera en la línea de placas de Arduino basadas en la arquitectura Intel x86, y se diseñó para usuarios fabricantes y comunidades educativas.

Figura 12. Tarjeta de desarrollo utilizada en el prototipo: Intel Galileo Generación1.



Esta tarjeta ofrece compatibilidad con cualquier desarrollo de Arduino, ya sean tarjetas de expansión de hardware (*shields*) o software propios de Arduino-IDE. Sus beneficios apuntan al abanico de soluciones que se pueden implementar en ella gracias a la capacidad de ejecutar una imagen del sistema operativo Linux, además, cuenta con el procesador Intel Quark SoC X1000, el primer producto de la familia de bajo consumo y núcleo pequeño de la tecnología Intel Quark . Esto representa el intento de Intel de competir en mercados como el Internet de las cosas y la informática portátil. El Quark SoC X1000 es una CPU compatible con arquitectura de instrucciones (ISA) Pentium (P54C / i586) de 32 bits, de un solo núcleo, que funciona a velocidades de hasta 400 MHz con 256 Mb de RAM DDR3 y memoria flash de 8 Mb, la Intel Galileo es mucho más poderosa que las placas Arduino que se encuentran actualmente en el mercado y ya existen diferentes foros de ejemplos e implementaciones de algunas soluciones IoT desarrolladas a partir de esta tarjeta, pues esta ha sido el enfoque que la empresa le ha dado.

Por otra parte, la Intel Galileo es capaz de conectarse a Internet a través del protocolo DHCP (por sus siglas en inglés *Dynamic Host Configuration Protocol*, en español ‘protocolo de configuración dinámica de host’), cuenta con un conector Ethernet

de 10/100. La placa incluye el mismo pin-out que un Arduino Uno Rev 3 (Intel Software, 2014):

1. 14 pins I/O digitales (6 de estos con salida PWM).
2. 6 pins entradas analógicas (A0 – A5).
3. Serial Communication: 0 (RX) y 1 (TX).
4. 8 pins Power (5V, 3V, GND, Reset...).
5. SPI: 10(SS), 11(MOSI), 12(MISO), 13(SCK).
6. I2C: A4 o pin SDA y A5 o pin SCL. Soportan la comunicación I2C (TWI).
7. ICSP Header: para conectar Arduino Shields

De esta manera, la Intel envía los datos de los sensores de la nariz electrónica hacia el servidor del grupo de investigación RadioGis a través de la conexión a un módem por puerto Ethernet. Esto es fácilmente reemplazable por un módulo de comunicación WiFi para la Intel Galileo Gen1.

Como se observa, la Intel Galileo cuenta con 14 pines de entrada digital y 6 analógicas, lo cual impide la conexión directa de las 16 señales de cada sensor, por lo tanto, se utiliza las entradas de protocolo de digitalización y envío de datos serial SPI. Esto se realiza a través de dos circuitos integrados de la casa de fabricación *Texas Instruments*: TLC2543CN1 y TLV2543IN1.

Estos dos circuitos integrados son conversores de señales analógicas a digitales de 12bits con capacitor conmutado y aproximación sucesiva, estos cuentan con tres entradas de control, las cuales son el selector de chip (CS), reloj de entrada y salida (I/O clock) y la dirección de la entrada de datos (*data input*). Los dos dispositivos cuentan con un multiplexor de 14 canales (razón por la cual se utilizan dos) en el chip que puede seleccionar cualquiera de las 11 entradas o cualquiera de los tres voltajes internos de autoevaluación. La función de muestreo y retención es automática. Al final de la conversión, la salida del final de la conversión (EOC) aumenta para indicar que la conversión está completa. El convertidor incorporado en el dispositivo presenta entradas de referencia de alta impedancia diferencial que facilitan la conversión, la escala y el aislamiento de los circuitos analógicos de la lógica y el ruido de la fuente.

Así pues, el circuito de adquisición diseñado se encuentra compuesto por dos leds, uno para cada conversor, los cuales indican el funcionamiento y energización de los mismos; y las borneras de entradas para las señales de los sensores. El esquemático circuital se puede observar en la figura 13, y su respectiva PCB en la figura 14, donde V_{cc} corresponde a la misma tensión de 5v que la tarjeta Intel Galileo tiene

como salida en uno de sus pines, esto con el fin de que el voltaje de referencia de los sensores sea el mismo para la digitalización.

Figura 13. Esquemático del circuito de adquisición y conversión análogo-digital de las señales de los sensores.

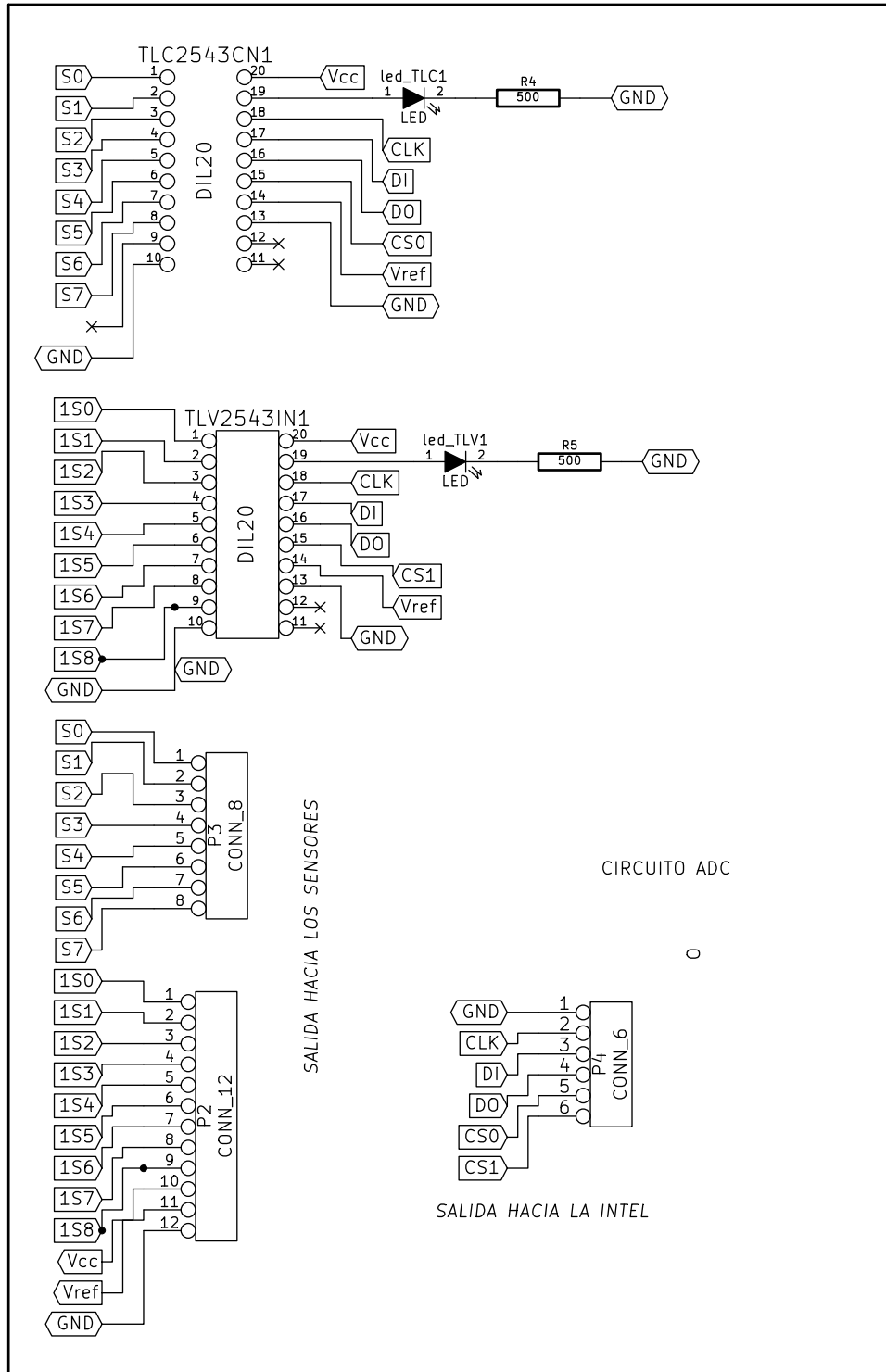
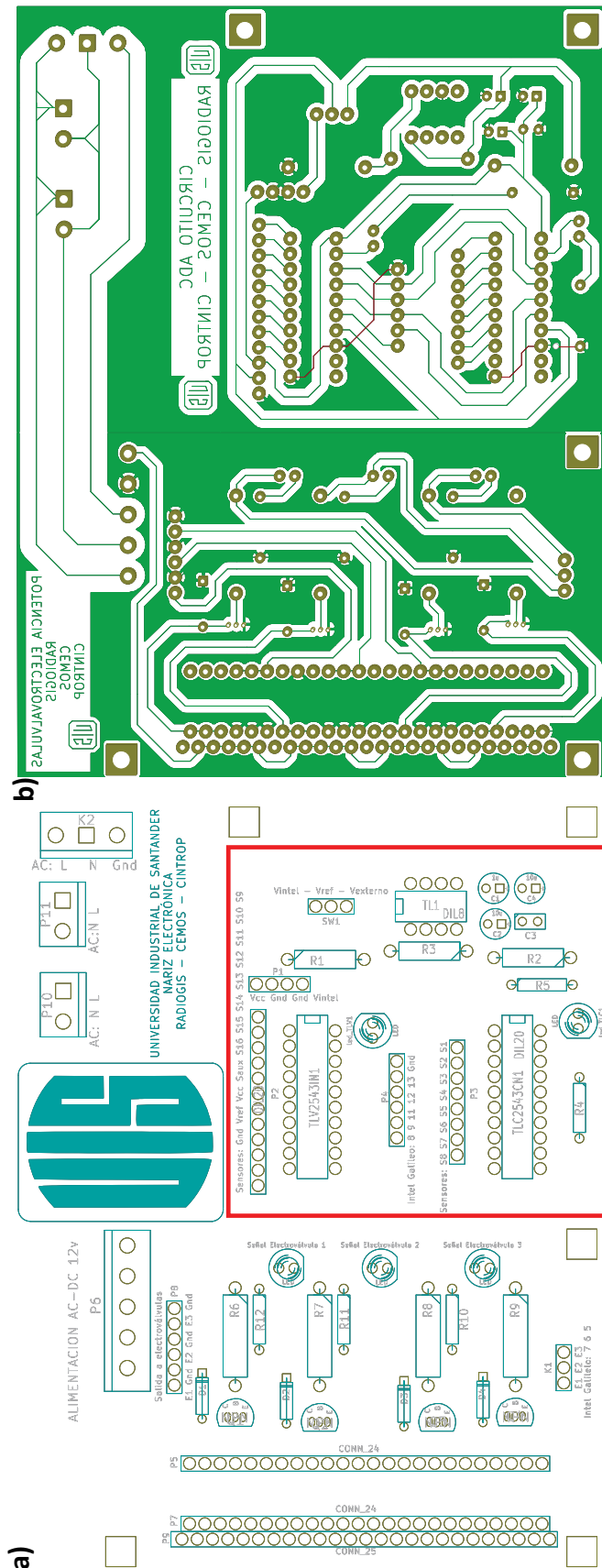
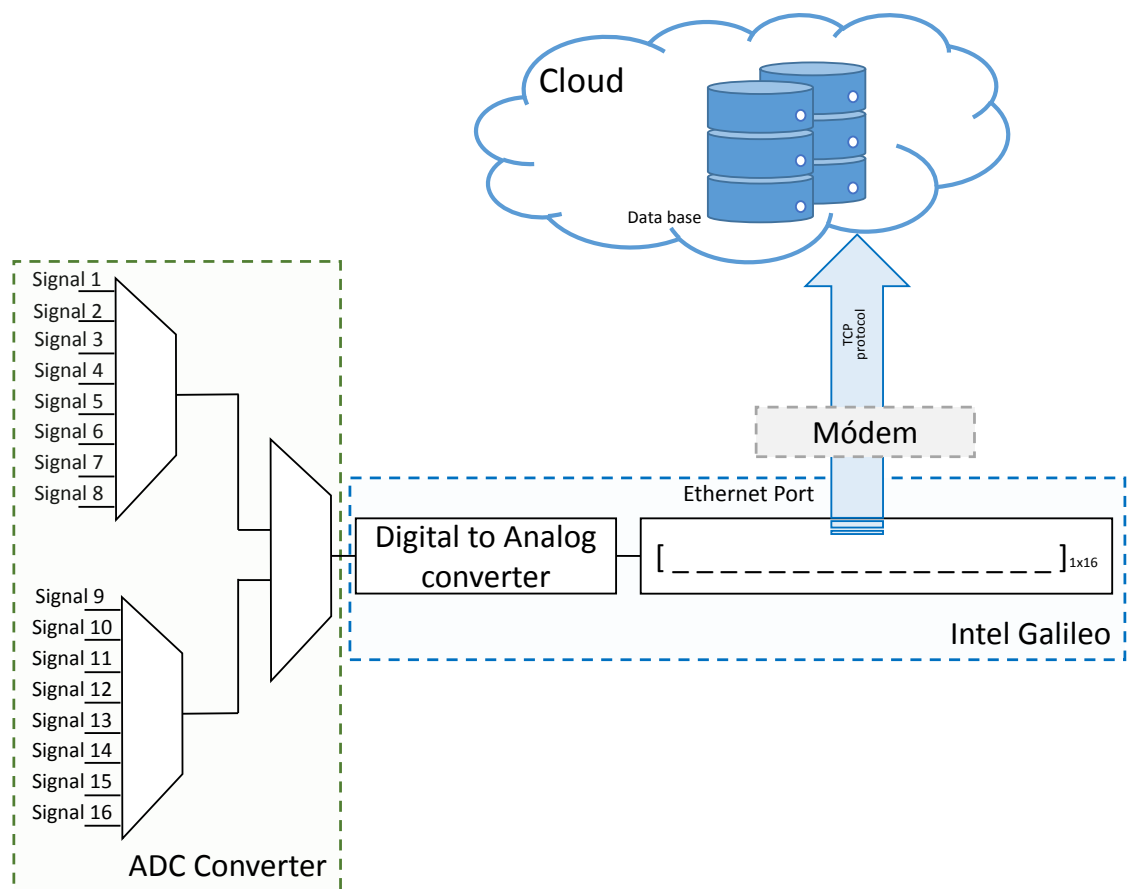


Figura 14. PCB del circuito ADC señalado dentro del recuadro rojo. a) Vista superior
 b) Vista inferior y pistas



Los pines CLK, DI, DO, CS0, CS1 de los circuitos integrados se conectan entre los pines 13, 12, 11, 9 y 8 respectivamente. Con una imagen de Linux básica donde se tiene el programa en Python para el envío de datos al servidor a través de Ethernet y del protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*). Cuando las señales digitales llegan a la tarjeta de desarrollo, esta interpreta la información (digital a análogo) convirtiéndola en vectores de 16 posiciones (los valores de cada una de las señales) y enviándola al servidor por medio de conexión cliente-servidor, es decir, haciendo uso de *sockets* de flujo. Este proceso de comunicación se puede observar en la figura 15 donde se aprecia la tarea que cada parte aporta.

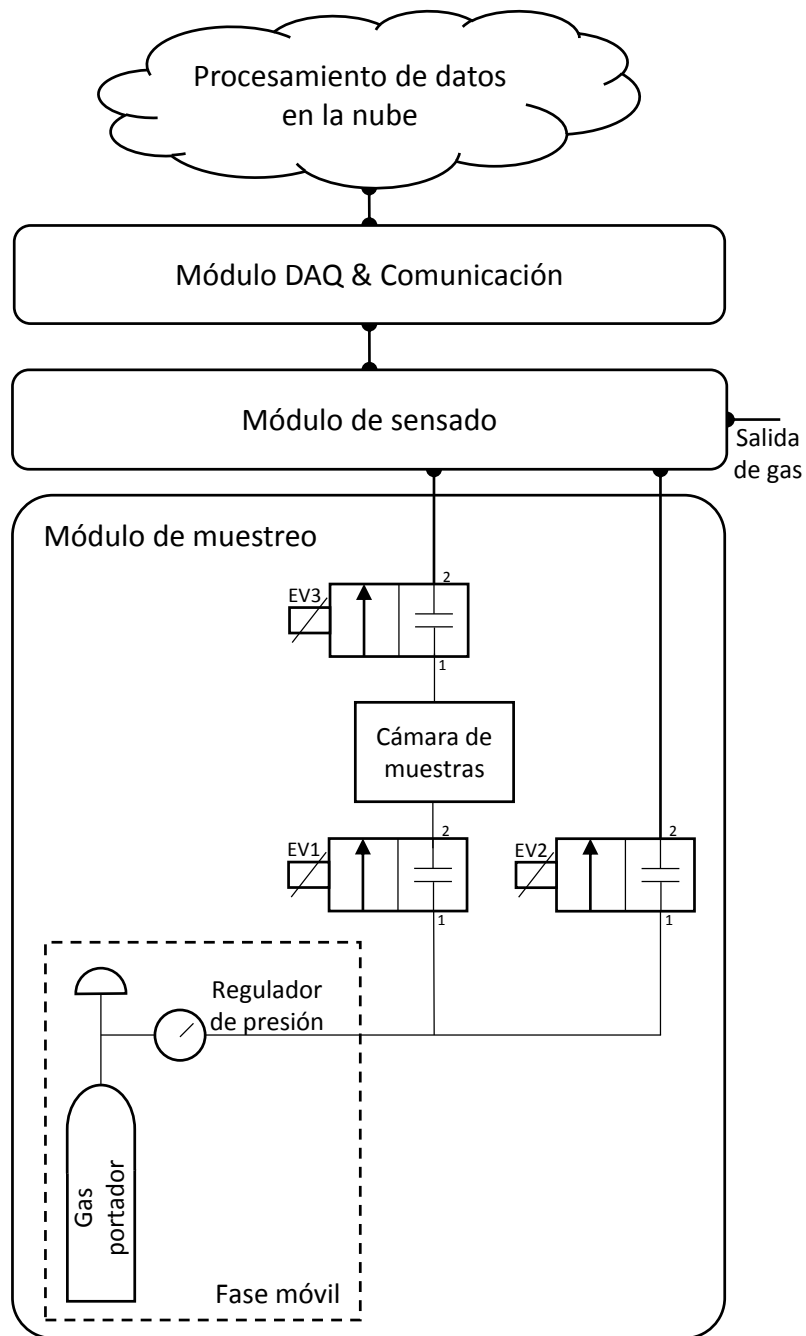
Figura 15. Esquemático del circuito de adquisición y conversión análogo-digital de las señales de los sensores.



1.2.4. Módulo de muestreo. Como sistema adicional a los módulos fundamentales de la nariz electrónica, se encuentra el módulo de muestreo. Este módulo está conformado por la cámara de concentración, una fase móvil, tuberías y electroválvulas que se encargan de acumular los volátiles y transportarlos hasta el módulo de sensado. La configuración de dichos elementos influenciará de forma decisiva la capacidad de la nariz electrónica para detectar los olores que se desean clasificar, por lo cual se recomienda que este módulo sea diseñado por un especialista del área que se trabajará.

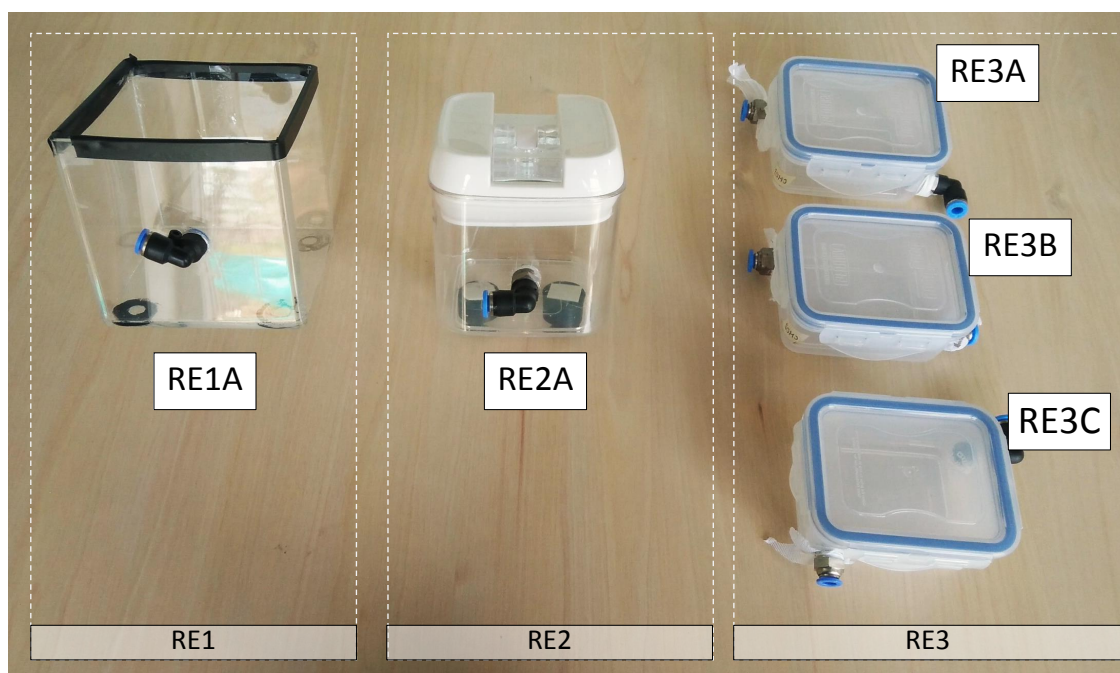
En términos generales, existen tres fases para realizar la medición empleando el módulo de muestreo independiente, las cuales corresponden a un tiempo de concentración de volátiles, tiempo de adquisición de datos y un tiempo de limpieza. Como se puede apreciar en la figura 16, cuando se realiza una medición con dicha configuración, se hace necesario el uso de electroválvulas y de un gas portador como fase móvil de la nariz electrónica.

Figura 16. Esquema básico de funcionamiento de sensado de la nariz electrónica usando módulo de muestreo independiente.



Por lo tanto, en primer lugar, se produce la concentración de partículas en un recipiente hermético de dimensiones condicionadas al objeto de interés. Este prototipo cuenta con tres tamaños diferentes de recipientes con nombres de referencia 'RE1A' (una unidad), 'RE2A' (una unidad), 'RE3A - RE3B - RE3C' (tres unidades), tal como se observan en la figura 17, para un total de cinco unidades diferentes.

Figura 17. Cámaras de muestreo referencias RE1 (1u) – RE2 (1u) – RE3 (3u)



El recipiente de acrílico 'RE1A' tiene 15.5 cm X 13.5 cm X 8 cm para un total de 1.67 Litros; el 'RE2A' también es de material acrílico y tiene 9.4cm X 9.4cm X 6.0cm para un total de 53ml; y por último, los recipientes de referencia 'RE3' son de plástico y tienen las dimensiones de 8.8cm X 6.6cm X 3.1cm, para un volumen total de 180ml.

Para realizar la correcta concentración de volátiles, las electroválvulas conectadas en la entrada (electroválvula 1) y salida (electroválvula 3) de la cámara de muestras se deben encontrar cerradas, de esta forma se minimizará el escape del gas. A su vez, la electroválvula 2 se encuentra abierta para habilitar el paso del flujo de la fase móvil (ver siguiente sección) hacia el módulo de sensores de gas, con el fin de adquirir el valor de resistencia referencia R_0 .

En segundo lugar, después de obtener por un tiempo determinado (t_c : tiempo de concentración) las moléculas a evaluar, se establece el tiempo de sensado (t_s : tiempo de sensado) donde se adquieren los datos de los sensores presentes a la muestra. Para ello, la fase móvil atraviesa la electroválvula 1, la cual se encuentra abierta, para desplazar de la cámara de muestreo las moléculas volátiles que viajan a través de la electroválvula 3 (ahora abierta) hacia la cámara de sensado. La electroválvula 2 se cierra instantáneamente cuando la 1 y 3 se abren. Este estado debe durar

lo suficiente para adquirir de los sensores la respuesta transitoria y estacionaria, en aplicaciones de baja concentración su duración es aproximadamente 10 minutos (por defecto).

Por último, para retirar las moléculas medidas y oxidar/reducir el material de los sensores para llevarlos a su estado de reposo, se procede a la fase final denominada limpieza, para ello se redirige por un tiempo determinado (t_l : tiempo de limpieza) el flujo pasivo únicamente hacia los sensores cerrando las electroválvulas 1 y 3; y reabriendo la electroválvula 2 (configuración de la fase de concentración).

En resumen, es fundamental respetar las tres fases temporales (t_c , t_s y t_l) para adquirir los datos de los sensores, entendiéndose que su durabilidad depende directamente de las particularidades de los gases a medir. Con respecto a sus características neumáticas, las descritas anteriormente sirven a modelos de narices electrónicas de laboratorio, supliendo necesidades básicas ante muestras de adquisición controladas.

1.2.4.1. Fase móvil. Debido a que los sensores de gas cambian constantemente su resistencia dependiendo del ambiente en el que se encuentre, se hace necesario establecer un valor de referencia R_0 cuyas variables de temperatura, humedad, V_h , entre otras, se encuentren controladas. Para ello las narices electrónicas, de manera similar a los cromatógrafos de gases, cuentan con una fase móvil que además de servir como punto de referencia, cumplen la función de transportar la mayor cantidad de moléculas posibles hacia la capa detectora de los sensores de gas.

Un gas portador debe cumplir con ciertas propiedades para que el sistema de inyección de muestra no se vea afectada y por ende la medida de resistividad sea correcta. En los cromatógrafos de gases es común encontrar gases inertes, para evitar la interacción con la muestra y la fase estacionaria, asimismo debe ser puro, de fácil acceso, económico y, por supuesto, adecuado para la muestra que se desea analizar. No obstante, para las narices electrónicas el gas portador de la fase móvil tiene menos restricciones, incluso es posible utilizar el aire del ambiente en donde se encuentran los sensores, claro está que debe estar libre de contaminantes de alta concentración.

En una nariz electrónica se busca establecer el punto de referencia de forma invariante para que el sistema de reconocimiento de patrones no pierda sincronización y no sea necesario llevar el sistema a efectuar de nuevo la calibración de datos. Es importante tener en cuenta que el desplazamiento de la resistencia de referencia de los sensores afecta el comportamiento de la medida para cuando se realice una adquisición de datos. En algunos casos estos cambios tienen comportamientos inversamente proporcionales, lo cual se recomienda con anterioridad realizar las medidas de calibración mostrados en las hojas de datos de cada modelo de sensor.

Como resultado el prototipo cuenta con 3 diferentes células de bombeo, las cuales se pueden observar en la figura 18:

1. Célula de bombeo CB01: Compresor de aire marca 'Ranger' modelo MPBS10, presión de 8.8 Kg/cm³ – 8.8 Bar – 125 PSI, motor de 1HP – 0.75KW, capacidad de 116litros/min – 4.1CFM, capacidad del tanque de 6litros – 1.6 Gal, PO#16067 y código 1148004.
2. Célula de bombeo CB02: Compresor de refrigeración unidad marca 'Embraco' modelo ADW57U6 con alimentación 115V 60Hz, motor de 1/4HP.
3. Célula de bombeo CB03: Mini-compresor de aire sin aceite de aerografía con diafragma, modelo DP-6105, potencia de 100W, 1900rpm, presión de aire 3bar/45psi, caudal 90L/min, peso 4.5Kgr, tensión 110V/60Hz, 1/4NPT.

Figura 18. Células de bombeo de la Fase Móvil prototipo de la nariz electrónica como IoT.



Célula de bombeo CB01



Célula de bombeo CB02



Célula de bombeo CB03

Será preciso mostrar que las células de bombeo CB01 y CB02 cuentan con motores sumergidos en aceite, de donde resulta agregar una bomba libre de olores agregados como lo es la célula CB03. Sus usos se encuentran orientados a la identificación de solventes o químicos con gran volatilidad, concentración y olor que puedan llegar a saturar los sensores de gas. De igual forma y por comodidad, hacer uso de una fase móvil implica el uso del módulo de muestreo independiente explicado anteriormente.

1.2.5. Prototipo final Una de las visiones que tiene este proyecto es convertir dispositivos de uso común para la comunidad de científicos y universidades en aparatos de la cultura *maker* o DIY (*Do It Yourself*, hágalo usted mismo), con el fin de cerrar cada vez más la típica brecha entre las grandes investigaciones y las problemáticas sociales vigentes de la comunidad que nos rodea. Es decir, escalar los avances existentes alrededor de las narices electrónicas a dispositivos de masificación que cualquier persona con interés en sus ventajas pueda acceder creando el dispositivo de manera rápida, sencilla y de acuerdo a sus problemáticas.

De esta manera, la nariz electrónica como prototipo IoT presenta la primera versión del dispositivo totalmente armable según los módulos básicos explicados anteriormente, listo para emparejarlo a una armazón propia y programarse según las necesidades que se quieran satisfacer, como se observa en la figura 19.

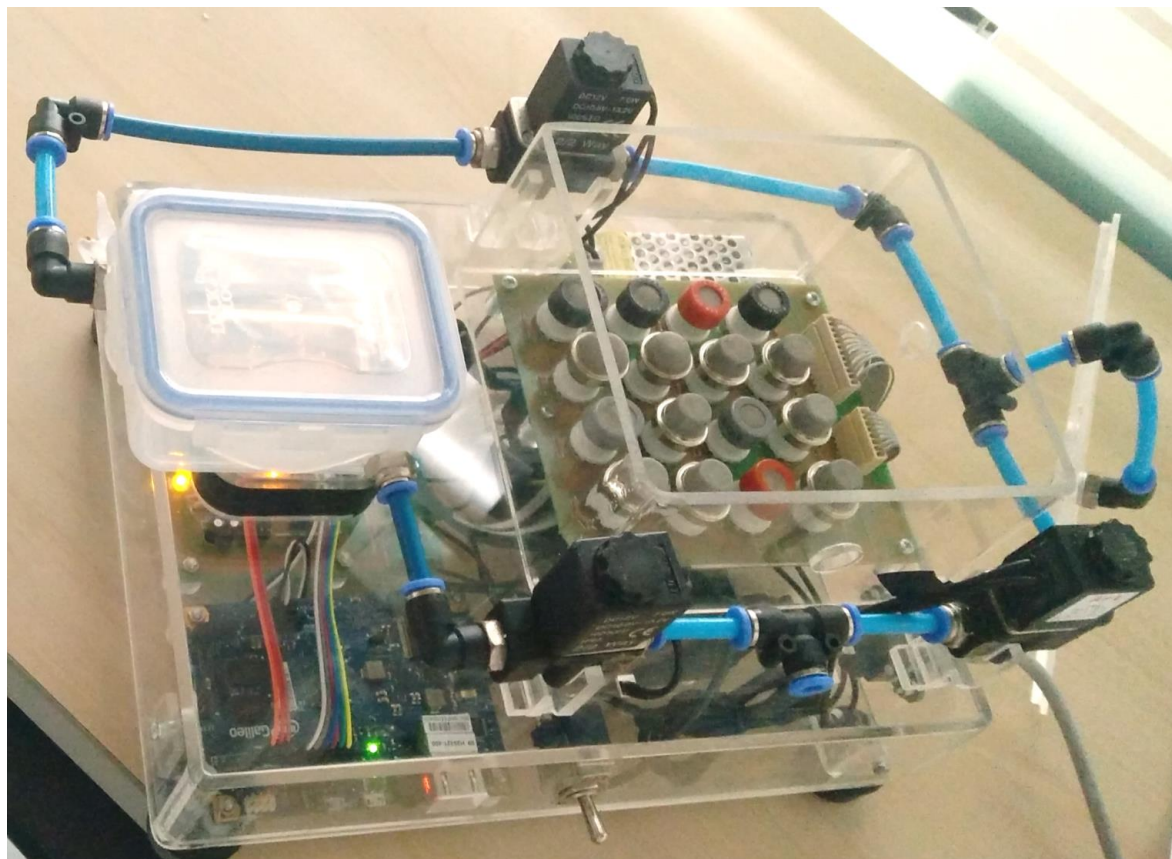
Figura 19. Equipo entregable bajo la filosofía DIY (*Do It Yourself*, hágalo usted mismo) como dispositivo IoT.



Uno de los ejemplos de armazón con las mismas características de nariz de laboratorio es la que se observa en la figura 20 la cual cuenta con dos leds de estado, un interruptor de palanca, conector a energía C14 macho. Está elaborado en acrílico transparente con fines educativos. Posteriormente es utilizado para aplicar la fase

de calibración de los sensores mediante el uso de cuatro diferentes solventes (Ver sección 3.4).

Figura 20. Nariz electrónica de laboratorio como dispositivo IoT. Prototipo ejemplo.



2. PROCESAMIENTO DE DATOS Y APRENDIZAJE DE MÁQUINA COMO SERVICIO.

Hasta ahora se ha detallado la terminal IoT que conforma a la nariz electrónica como un servicio, explicando claramente cada una de sus unidades bajo la filosofía DIY. A continuación, se formula el desarrollo de la capa de *cloud computing*, con la implementación de rutinas y algoritmos de reconocimiento de patrones que sean almacenados y procesados en la nube. La información de los diferentes sensores de gases químicos de la nariz electrónica combinada y tratada con técnicas de reconocimiento de patrones permiten la identificación de las sustancias volátiles. Estas implementaciones pertenecen al módulo de análisis y procesamiento de la que se nombró en la introducción del capítulo ‘Diseño y construcción de una nariz electrónica como dispositivo IoT’, ver figura 2.

En primer lugar y para contextualizar al lector sobre plataformas IoT relacionados al procesamiento de datos basados en aprendizaje de máquina, se presentan las generalidades, datos de interés y visiones futuristas de los beneficios que implican la unión de estas dos tendencias. Posteriormente, se presenta el procesamiento de las señales de la nariz electrónica con implementación en la nube. Finalmente, se resumen las especificaciones técnicas del servicio a partir de la plataforma RIoT desarrollada en el grupo de investigación RadioGis.

2.1. GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS IOT ASOCIADOS A *MACHINE LEARNING*.

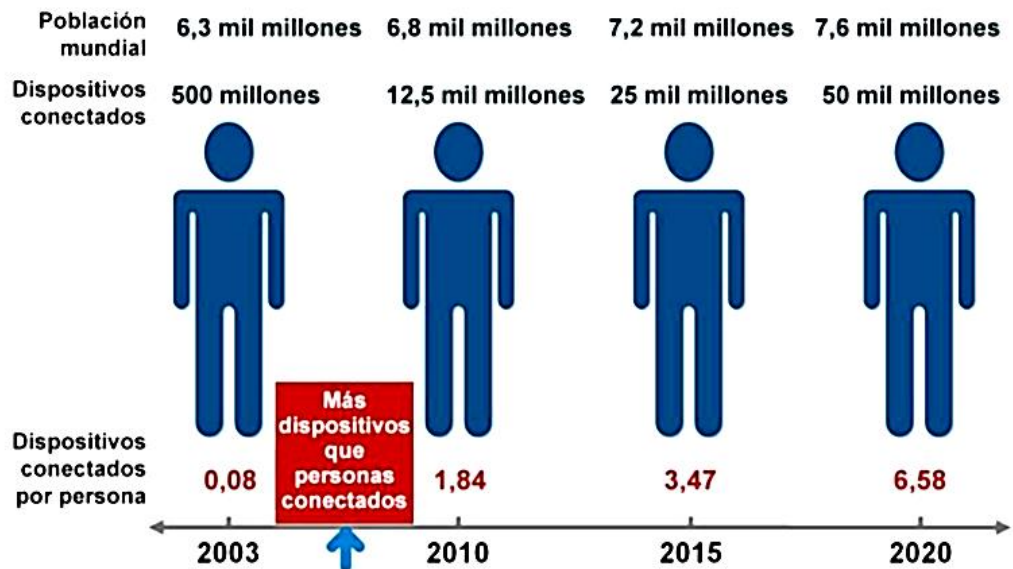
El impacto que ha tenido el uso de internet desde hace una década atrás permite hablar de una nueva generación que constantemente se encuentra conectada a la red de información distribuida, la cual involucra educación, comunicación, negocios, ciencia, gobierno y humanidad. Prácticamente, se ha reducido a la imposibilidad de pensar en un mundo sin internet y su avance ha sido tan estruendoso que en la actualidad no se habla solo de dispositivos computadores interconectados entre sí, sino la capacidad de que cualquier tipo de dispositivo tenga acceso a la red con un traspaso de información útil. Es allí donde nace el concepto de Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés *Internet of Things*) basado en la interconexión digital de cualquier tipo de objeto, tanto con cualquier otro de su alrededor como con las personas a través de internet (Bliznakoff, 2014).

El *Cluster of European Research Proyects* definió en su *Strategic Research Roadmap* al IoT como “una infraestructura de red global y dinámica con capacidad de auto configuración basada en protocolos de comunicación estandarizados e interoperables donde las cosas (*things*) físicas y virtuales tienen identidades, atributos físicos, personalidad virtual, y haciendo uso de interfaces inteligentes que se integran perfectamente en la red de información” (IERC., 2009), es decir, una primera aproximación del IoT con referente a Inteligencia artificial.

En 1999 Kevin Ashton perteneciente al *Auto-ID Center* del MIT propuso el concepto de IoT trabajando en un sistema de sensores para identificadores de radiofrecuencia definiéndolo como: “El IoT es el mundo en el que cada objeto tiene una identidad virtual propia y capacidad potencial para integrarse e interactuar de manera independiente en la red con cualquier otro individuo, sea una maquina o un humano” (Pérez Hernández, 2015). Cuya visión del tema la contextualizó de forma reducida que “hoy en día, los ordenadores (y, por tanto, Internet) dependen casi por completo de los humanos para obtener información. Prácticamente la totalidad de los datos alojados en Internet han sido generados por humanos, pero tenemos atención, precisión y tiempo limitados; luego no podemos considerarnos como el medio ideal para obtener información del mundo real. (...) Si hubieran equipos que pudieran saber todo acerca de todas las cosas, obteniendo los datos sin ayuda de nadie, podríamos controlarlo todo; reduciendo gastos, pérdidas y costes” (Ashton, 2009).

Todo esto se resume en el concepto de dispositivos con identidad propia, identificables y únicos en la red, estos son capaces de procesar información de forma independiente y su uso no se convertiría en una resistencia para el rendimiento de la red global. De hecho, se afirma que el surgimiento del IoT en la historia sucedió “cuando se conectaron a internet más “cosas u objetos” que personas” (Evans, s.f.). Este tiempo se puede ubicar entre el 2008 y 2009, justamente con la explosión del concepto de BigData (Pérez, Pérez Molina, Navarro, y López-Vélez, 2009) como se puede observar en la figura 21.

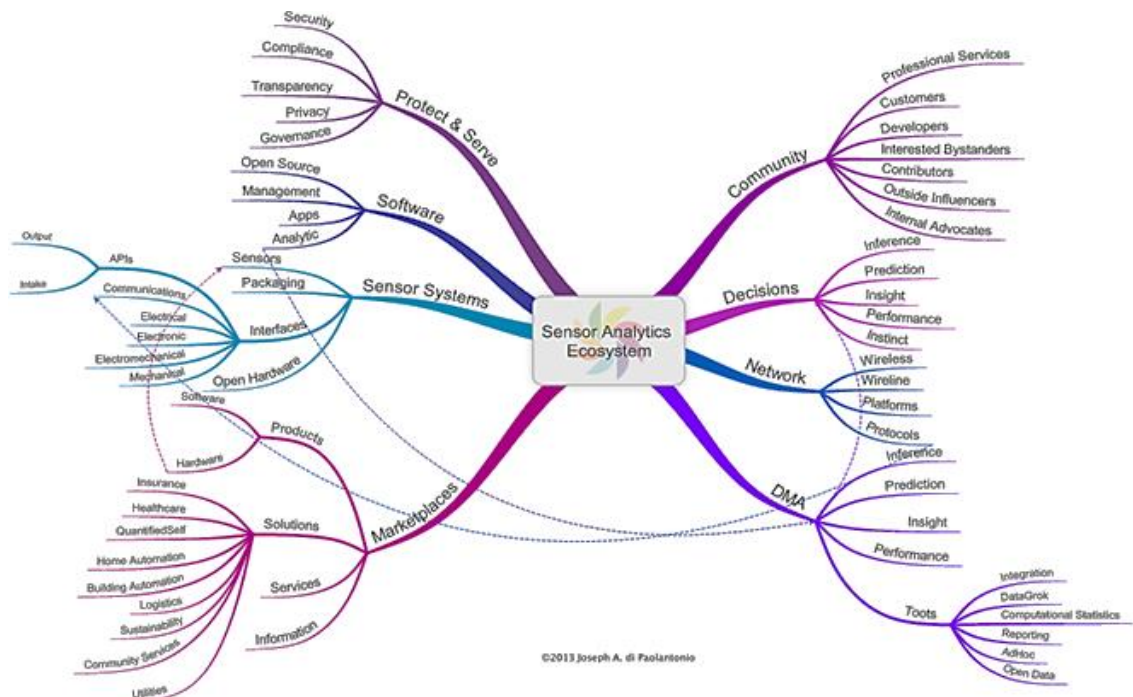
Figura 21. Infografía del crecimiento de dispositivos conectados a internet (InShuttle, 2015).



El alcance de conectar el entorno al aprendizaje de máquina a través de una inteligencia artificial tiene una magnitud más grande de la que se imaginar. Las aplicaciones de esta unión tecnológica giran alrededor de la vida cotidiana cubriendo las facetas

desde salud hasta seguridad, desde ciudades inteligentes (*Smart City*) hasta fabricación. Una pequeña aproximación del potencial se puede observar en la red de la figura 22, donde se pueden involucrar el ámbito del medio-ambiente con soluciones orientadas a la proyección y salud del ser humano y el planeta; la industria con la automatización, monitorización y optimización de procesos; ciudades inteligentes; control del hogar; hasta incluso salud con medicinas o píldoras inteligentes que traen consigo nano-sensores que permiten el monitoreo constante del cuerpo humano. Nos encontramos en la nueva revolución tecnológica donde los objetos cotidianos pasan a estar conectados entre sí dotándose de nuevas funcionalidades, permitiéndolos controlar y administrar desde tabletas, ordenadores o teléfonos celulares de forma inteligente.

Figura 22. Red de aplicaciones IoT tomado de (Evans, s.f.).



Bajo ese concepto, el aprovechamiento de las cualidades de IoT maximizadas a través de la inteligencia artificial convierten al internet de forma sensitiva, con propio centro de procesamiento para la resolución de problemas de forma automática, es decir, la toma de decisiones adecuadas en tiempo real en función de resultados previos, las experiencias. Y esta es una oportunidad para comenzar a estar a la vanguardia de la nueva revolución tecnológica.

2.2. PROCESAMIENTO DE SEÑALES A PARTIR DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES.

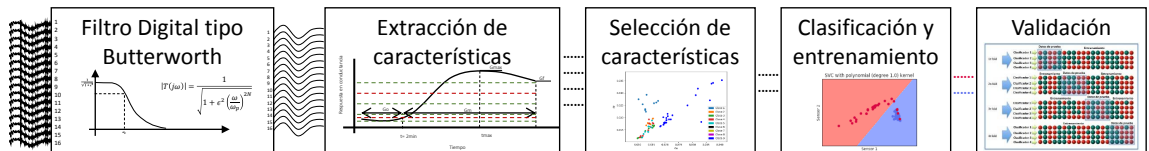
Las narices electrónicas comúnmente se encuentran asociadas a un procesamiento de datos basado en reconocimiento de patrones. Esto consiste en extraer información de

los datos de forma que permita establecer propiedades entre los objetos analizados y así inducir conjuntos con las mismas características, es decir, le otorga a la nariz la capacidad de detectar, cuantificar e identificar compuestos volátiles.

Sin embargo, es posible escalar dichos módulos a un procesamiento de datos que se pueda emplear en diferentes áreas, ya sea desde aplicaciones agroindustriales hasta detección de explosivos o incluso identificación de enfermedades. Para ello el procesamiento de datos del prototipo mostrado en el capítulo anterior, se encuentra implementado en una plataforma IoT y programado en lenguaje Python según las observaciones y sugerencias desarrolladas durante la investigación realizada por (Ruiz Jiménez y cols., 2015). Un sistema de reconocimiento de patrones básicamente se compone de las etapas de extracción de características principales, selección de las características más relevantes, clasificación de datos, entrenamiento de la máquina y por último validación del aprendizaje.

Como se observa en la figura 23, el procesamiento de datos implementado inicia por los 16 canales correspondientes a las señales de los sensores. Esta son alojadas en la base de datos (*Electronic Nose Data Base*) en forma de matriz de datos cuyas filas corresponden a la unidad de tiempo muestreado adquirido y las columnas a cada uno de los canales. Adicionalmente, se encuentran identificados por la etiqueta que el usuario le ha puesto al momento de guardar la información.

Figura 23. Etapas de funcionamiento del procesamiento de datos de la nariz electrónica en la nube.



El primer paso computacional es la aplicación de un filtro digital tipo Butterworth con frecuencia de corte $W_n=0.2$ y orden 1, es decir, reducción del ruido de -20dB por cada década en frecuencia. Este filtro es aplicado de forma independiente a cada señal. Posteriormente, el usuario deberá configurar las etapas de extracción de características, selección de características, clasificación y entrenamiento, y validación, según las características que se nombran en las subsecciones siguientes.

2.2.1. Extracción de características. Esta etapa se encarga de extraer cuidadosamente los parámetros descriptivos que cada señal presenta, las cuales la hacen única y perteneciente a un conjunto de clasificación llamado ‘clase’. Adicionalmente, en esta etapa se incluye una compensación de la deriva de los sensores causado por variabilidad de temperatura y humedad en el ambiente.

Como se observa en la figura 24, la curva de respuesta en conductancia (inverso de la resistencia) del sensor varía a través del tiempo en medida que se oxida/reduce el material según el gas de prueba. En la tabla 3 se muestran los diferentes parámetros que se pueden extraer de la respuesta de los sensores.

Figura 24. Principales parámetros de una señal de sensor de gas para la extracción de características.

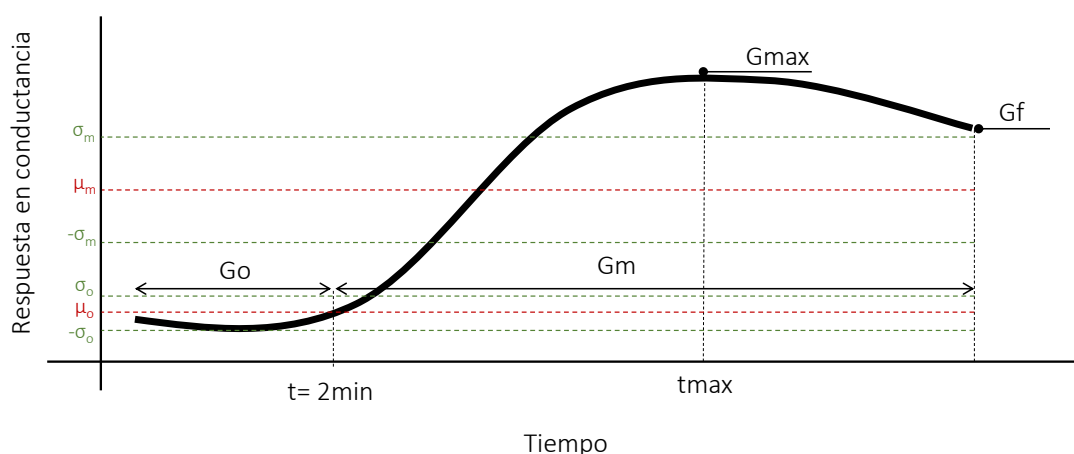


Tabla 3. Parámetros disponibles en el procesamiento de datos de la nariz electrónica como dispositivo IoT.

<i>No</i>	<i>CARACTERÍSTICA</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
1	G_o	Promedio de las primeras 200 muestras: conductancia inicial referencia.
2	G_f	Valor conductancia final.
3	G_{max}	Valor conductancia máxima.
4	G_m	Vector de conductancia de muestra (sin conductancia referencia).
5	t_{max}	Valor tiempo en la que se presenta la conductancia máxima.
6	μ_m	Valor de la media aritmética del vector G_m .
7	σ_m	Valor de la desviación estándar del vector G_m .
8	μ_o	Valor de la media aritmética de las 200 primeras muestras.
9	σ_o	Valor de la desviación estándar de las 200 primeras muestras.
10	G_{max_Go}	Razón de cambio G_{max}/G_o .
11	$G_{max_Go_n}$	Razón de cambio normalizado $(G_{max}-G_o)/G_o$.
12	Δ_G	Variación de cambio $G_{max}-G_o$.

En el momento de procesar nuevos datos, el usuario tendrá la capacidad de escoger alguno de los parámetros anteriores según su experiencia en el tema, de todas formas, si la característica clasificatoria no se encuentra ya implementada, el usuario podrá conectar una nueva función que extraiga el parámetro relevante y anexarlo al sistema de procesamiento. Esta flexibilidad sitúa a la nariz electrónica en un dispositivo con la facilidad de convertir cada vez su desarrollo de aprendizaje en un procesamiento robusto y complementario.

2.2.2. Selección de características. Existe el caso en que diferentes características de las señales representan la mayor parte de su información clasificatoria, pero de forma a priori es difícil conocer las combinaciones acertadas que optimicen la separabilidad de los datos. Para ello, la etapa de selección de características tiene la tarea de reducir la cantidad de variables, eliminando las redundantes y las que no aportan información adicional. Esto se traduce en la disminución del coste computacional y el tiempo de procesamiento.

En cualquier caso que se presente en las combinaciones de características, se utiliza la técnica de análisis de componentes principales (por sus siglas en inglés PCA *Principal Component Analysis*, la cual reducirá la dimensionalidad a un conjunto de datos con mayor valor de varianza a partir de la matriz de covarianza de las señales. Esta técnica elimina las redundancias o correlaciones que existan entre la respuesta de los sensores.

Para configurar esta etapa, el usuario deberá escoger la cantidad de PC's (componentes principales) que desea utilizar los cuales constituirán las nuevas características que se ingresarán en la etapa de clasificación y entrenamiento

2.2.3. Clasificación y entrenamiento. Los algoritmos descritos anteriormente se complementan con la etapa de clasificación, donde se realiza el entrenamiento de la máquina según los patrones identificados. Estos pueden ser sometidos a diferentes tipos de clasificadores, ya sean supervisados, no supervisados; lineales, no lineales; binaria, analógica; paramétrico, no paramétrico, etc.

Se ha decidido aplicar los algoritmos de aprendizaje basados en máquinas de soporte vectorial (SVM por sus siglas en inglés *Support Vector Machine*), que conforman la familia de las técnicas más poderosas y populares del aprendizaje automático gracias a su robustez. La técnica es capaz de generalizar bien diferentes problemas de clasificación como de regresión.

La técnica de SVM consiste en la creación de hiperplanos en un espacio de dimensionalidad alta donde la separabilidad de clases es máxima, un ejemplo de esto se puede observar en la figura 25 donde la separabilidad en el plano de segunda dimensión es un caso no lineal, y al realizar la proyección a tercera dimensión se puede encontrar un hiperplano que separe las clases. Lo que permite concluir que el algoritmo

es capaz de aplicarse a casos linealmente separables, figura 26 ítem a, y casos no separables linealmente como en la figura 26 ítem b, en cuyo caso la solución es una banda no lineal.

Figura 25. Proyección mediante una función en R2 a R3. (Gala García, 2013)

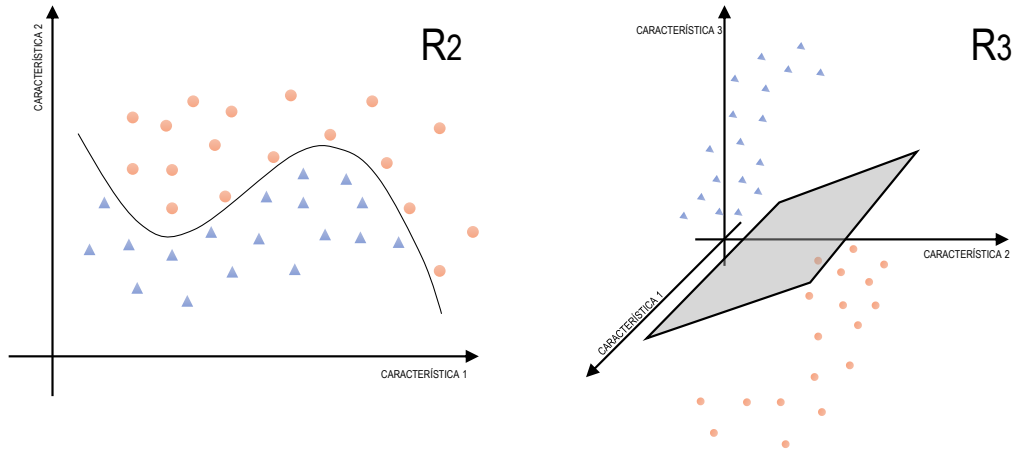
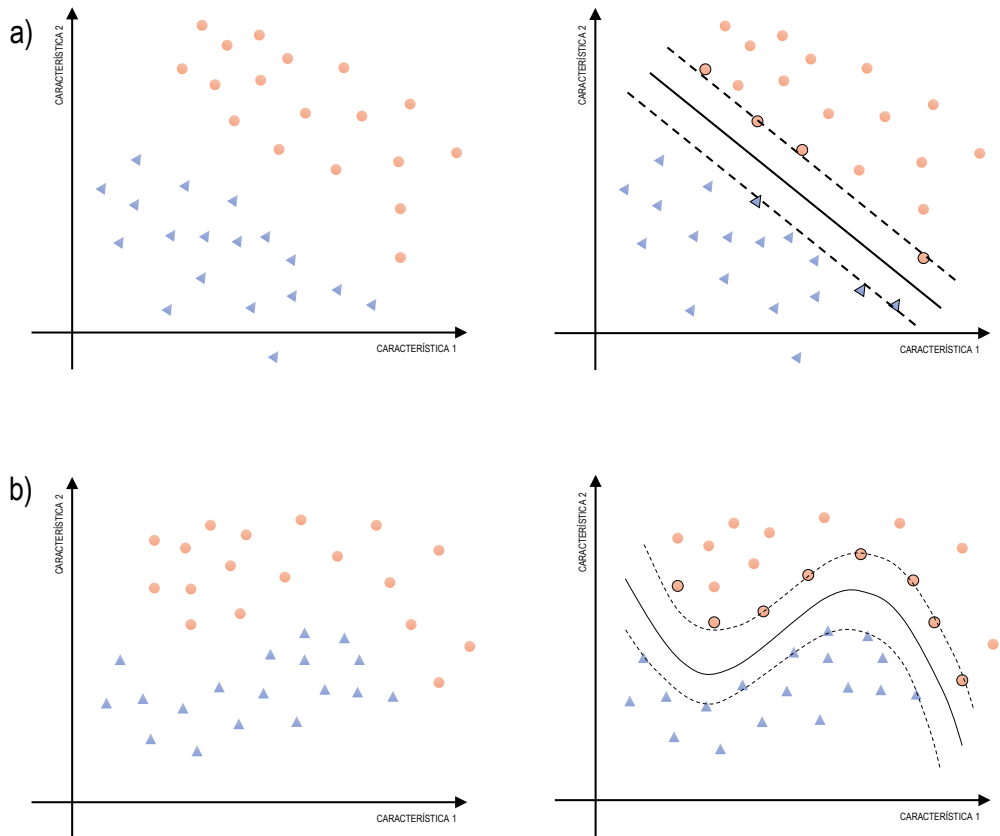
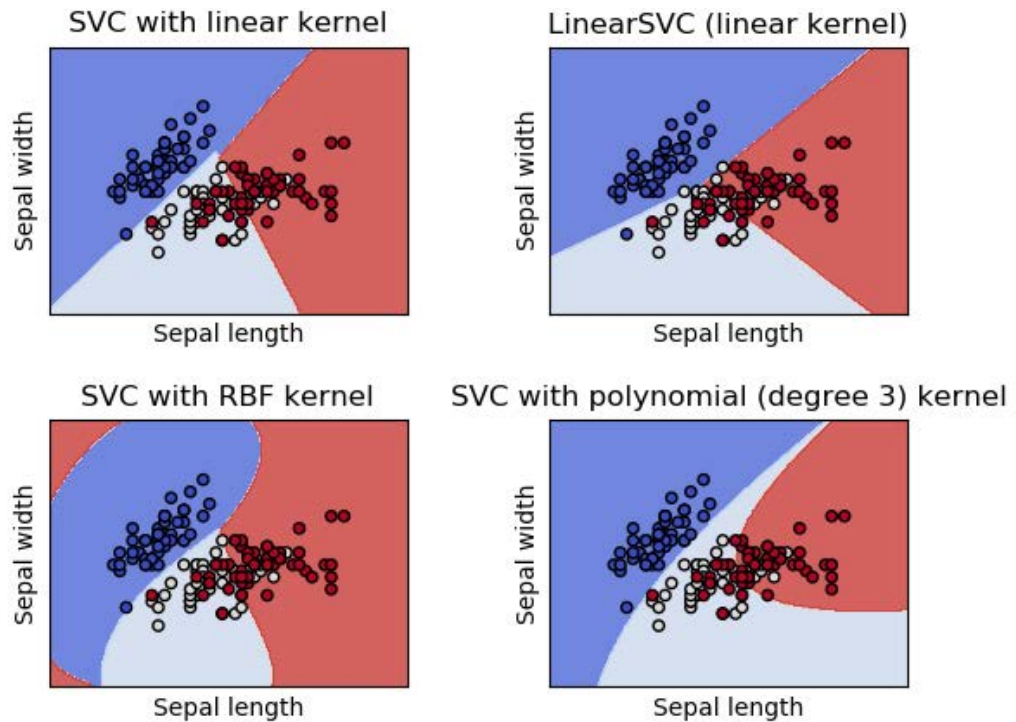


Figura 26. Ejemplo de los dos casos de separabilidad: a) caso linealmente separable, b) caso no linealmente separable. (Gala García, 2013)



Cuando se transforma los datos de una dimensión n a espacio euclidiano de mayor dimension, esta se realiza aplicando funciones *kernel* que realizan el producto escalar en el espacio expandido. En esta implementación de la nariz electrónica se desarrollan los algoritmos basados en la librería ‘scikit-learn v0.19.1’ de Python, en ella se encuentran alojadas la programación de máquinas de soporte vectorial con *kernel* lineal, polinómica, radial y una excepción en el kernel lineal utilizando ‘one-vs-rest’ llamado ‘*LinearSVC*’. Ver figura 27.

Figura 27. Ejemplo de las funciones *kernel* implementadas en el procesamiento de datos de la nariz electrónica. (Pedregosa y cols., 2011)



La configuración del clasificador en aplicaciones *multiclass* viene dado por una clase contra el resto, lo que implica el entrenamiento serial y progresivo de distintas máquinas de soporte vectorial, cada una con el *kernel* cuyo caso entregue menor error de asertividad. Para estudiar las formulaciones matemáticas aquí implementadas se puede realizar la consulta en los términos de la librería usada (Pedregosa y cols., 2011).

2.2.4. Validación del clasificador De la misma forma que en el caso de la etapa de clasificación y entrenamiento, la librería ‘scikit-learn v0.19.1’ de Python (Pedregosa y cols., 2011) permite realizar una validación cruzada de las máquinas entrenadas. Esta validación se itera alrededor de 500 veces con el fin de encontrar en cada caso el mayor error (*accuracy*) en que las máquinas pueden caer. El tamaño de la muestra a evaluar corresponde al 30 % del tamaño muestral completo. Al final del proceso, se escoge la máquina de soporte vectorial con el *kernel* que tenga menor error de predicción.

2.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SERVICIO NARIZ ELECTRÓNICA

El grupo de investigación RadioGis de la Universidad Industrial de Santander cuenta con una plataforma IoT la cual permite incluir servicios que se diseñan no solo en la universidad sino también desarrolladas por otros entes interesados.

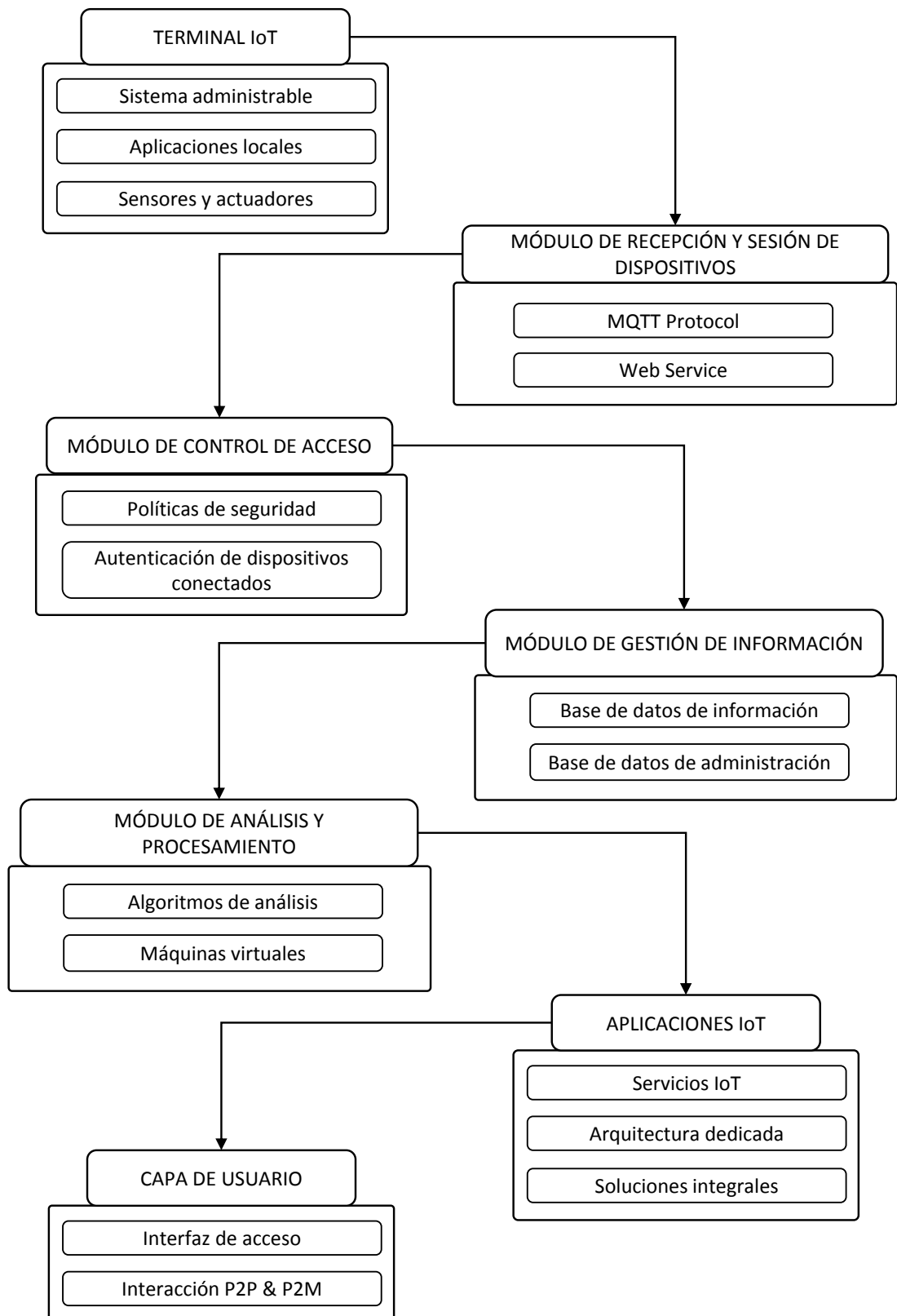
Esta plataforma es capaz de gestionar múltiples tipos de terminales móviles, ya sean dispositivos (como el caso de la nariz electrónica), procesos (como los procedimientos industriales), sistemas virtuales (otros módulos de servicio) o personas (clientes, usuarios finales). Hasta la escritura de estas memorias, el último servicio que ha entrado en funcionamiento ha sido el producto de investigación ‘Robot de telepresencia’ (Trillos Leon y Moreno Lozada, 2017). A su vez, se encuentra abierta para el uso de desarrolladores, lo que implica la independencia de recursos y control de los mismos, así como la facilidad de migrar a otras plataformas de mayor tecnología como es el caso de Google Cloud IoT, Plataforma AWS IoT de Amazon o Microsoft Azure IoT Suite.

Gracias a dichas facilidades, el servicio de la nariz electrónica se ha implementado bajo las técnicas y requisitos exigidos por la plataforma IoT de RadioGis estableciéndose con la metodología mostrada en la figura 28. La terminal móvil se comunica a través de *Ethernet* con el módulo de recepción y sesión de dispositivos, el cual pertenece a la capa de conectividad. Este módulo soporta el protocolo ‘MQTT’ (*Message Queue Telemetry Transport*)(Hunkeler, Truong, y Stanford-Clark, 2008) que esta estandarizado para la administración de múltiples dispositivos IoT como gestión y protocolos de seguridad. También se tiene como protocolo *Web Service*, que puede estar escrito en JSON (Crockford, 2002), PHP (Rasmus, 1995) o Python (?, ?).

El siguiente módulo corresponde al control de acceso que gestiona las políticas de seguridad de ingreso de los terminales IoT, puesto a que la plataforma se encuentra abierta a Internet, se hace necesario tomar las medidas y precauciones necesarias para garantizar el servicio y la integridad del terminal IoT. En vista de esto, el módulo asigna a cada dispositivo una etiqueta de reconocimiento, lo que impide el ingreso de dispositivos nuevos nunca utilizados o no conocidos por el sistema.

La plataforma cuenta con un módulo de gestión de información, el cual se encarga de almacenar y administrar los datos generados por el terminal IoT. El modelo de base de datos ((Data Base)) permite realizar consultas de los servicios para conocer los dispositivos asociados, usuarios habilitados para cada servicio y la cantidad de perfiles esquematizados. Se tiene la visión de complementarse continuamente con el procesamiento de datos, lo que hará del módulo una de las fases más robustas e importantes de la plataforma.

Figura 28. Funcionamiento del servicio de la nariz electrónica implementado en la plataforma IoT de RadioGis



El siguiente módulo es el análisis y procesamiento de datos desarrollado a partir de máquinas virtuales que realizan el papel de contenedores, es decir, tienen la capacidad de manipular otras máquinas físicas (como servidores locales) u otras máquinas virtuales (como las que se encuentran en la nube), y de esta forma alojar software, algoritmos, información y en general procesamiento dependiendo del almacenamiento y los requisitos de consumo de hardware. En conclusión, es aquí donde se encuentra la inteligencia de la plataforma.

Ahora, la administración de todos los servicios prestados por la plataforma se da en el módulo de aplicaciones IoT, que es el conjunto de todos esos recursos, procesamiento, base de datos, políticas implementadas, protocolo y dispositivos. Se entienden como aplicaciones de gestión el estudio de la conectividad entre módulos a partir de una arquitectura dedicada. Las soluciones integrales involucran todas las aplicaciones a partir de los servicios que se le otorgue a determinado dispositivo, es decir, si el mismo terminal móvil trabaja en el área de medicina, seguridad nacional, etc. Es posible encontrar servicios que consuman los mismos recursos pero funcionan de distinta manera, pues no es lo mismo una nariz electrónica para detectar minas como para identificar insectos, es por ello que la terminal IoT está diseñado como un estudio del usuario en términos de desarrollo, permitiendo relaciones entre personapersona (P2P) o personamáquina (P2M).

La plataforma cuenta con las siguientes características:

1. Acceso web con dominio propio certificado por conexión <https://radiogis.uis.edu.co>.
2. Máquinas virtuales en CONNUS que soporta Q-GIS y GNU Radio, además de contenedores con plantillas para nuevos servidores web y base de datos.
3. Base de datos relacionada en PostgreSQL con soporte de datos georeferenciados.
4. Implementación de protocolo MQTT para el inicio de sesión de dispositivos hacia la plataforma.
5. Implementación de *Web Service* en JSON
6. Servicio para la administración de servidores vía web usando conexión shell-nabox.
7. Implementación de 3 servicios IoT en línea:
 - a) Robot de tele-presencia
 - b) Nariz electrónica
 - c) Consulta por base de datos de coberturas Corine Land Cover

Para la gestión del servicio, existen tres perfiles:

1. **EL CLIENTE:** Es el usuario final, quien en última instancia va a usar el servicio de forma transparente, es decir, no es necesario que tenga los conocimientos del funcionamiento de toda la plataforma, conexiones de la nariz electrónica, ni entrenamientos, pero tiene interés principal en los resultados arrojados por el servicio de nariz electrónica.
2. **EL DESARROLLADOR:** Es la persona que en primer lugar debe diseñar el módulo de muestreo de la nariz electrónica a partir de las especificaciones y requerimientos en la que se aplicará el servicio, posteriormente deberá realizar las conexiones a través de la habilitación de las funciones en el módulo de análisis y procesamiento. Por último y si es necesario, desarrollar una interfaz gráfica dependiendo de la aplicación.
3. **EL ADMINISTRADOR:** Se encarga de mantener el servicio en óptimas condiciones, el mantenimiento del mismo con respecto a las actualizaciones de nuevos dispositivos en el desarrollo, además se encarga de establecer el usuario y contraseña al cliente o desarrollador según el servicio adquirido.

3. NARIZ ELECTRÓNICA COMO DETECTOR DE TRIATOMINOS.

La zoonosis causada por el protozoo *Trypanosoma cruzi* se refiere a la enfermedad conocida como el Mal de Chagas-Mazza, tripanosomiasis americana o también enfermedad de Chagas y es transmitida por medio de aproximadamente 140 especies pertenecientes a la subfamilia Triatominae. Esta enfermedad se distribuye principalmente por el continente americano, desde el sur de California a la región central de Argentina y Chile (Palmezano, Plazas, Rivera, y Rueda, 2015).

Específicamente en Colombia a través del ministerio de salud se manejan diferentes planes de acción para la atención, diagnóstico y tratamiento de la enfermedad. Se habla de un aproximado de 437.000 personas infectadas y cerca de 4.8 millones de personas en riesgo de contraerla en el país, donde se produce lesiones crónicas cardíacas irreversibles en el 30 % de los infectados y lesiones neurológicas y digestivas en el 10 % (Vilasanjuan, 2015). Además es posible encontrar que al menos el 99 % de la población infectada sigue sin tener acceso al diagnóstico y tratamiento de la enfermedad, muchas veces por desconocimiento de su condición, pues en el momento que se realiza una intervención en las viviendas para detectar el vector, es el momento en que se identifica la enfermedad en una persona.

La transmisión de la endemia ha sido reportada en más de 15 departamentos de la zona oriental del país con transmisión transfusional en otros departamentos. Entre estas zonas se encuentra Santander donde se realizan trabajos de investigación para identificar factores trascendentales a favor de la mitigación de la enfermedad (?). Algunos de estos avances son liderados por el centro de investigación CINTROP (Centro de investigaciones de enfermedades tropicales) perteneciente a la Universidad Industrial de Santander (UIS), el cual en cooperación con otros grupos ha venido realizando estudios sobre la distribución, infección e implicaciones del desarrollo de la enfermedad.

“En el desarrollo de varios estudios nacionales y regionales patrocinados por OMS, TDR, Ministerio de Salud, COLCIENCIAS, Secretarías de Salud de Santander, Norte de Santander y Arauca se han logrado obtener 8040 especímenes de triatominos de los cuales 300 se han examinado para infección natural. Utilizando la clave de Lent and Wygodzinski (1979) para la identificación morfológica de especies de triatominos, se han identificado en Santander 13 especies, destacándose *R. prolixus* como la especie predominante en ambientes intradomiciliarios, seguida del *T. dimidiata* en áreas muy intervenidas por la acción de asentamientos humanos” (Angulo Silva, 2000). Por lo tanto, la visión de la enfermedad como epidemia ha llegado a alertar al país obligando al gobierno colombiano a la generación de innovadoras estrategias por medio de la apertura de convocatorias de proyectos (articulados por Colciencias) para el control no solo del Chagas sino también de otras enfermedades transmitidas por vectores (malaria, dengue, chikunguña, zika, leishmaniasis) (Colciencias, 2016).

Como se nombró en la introducción, es una tarea casi exclusiva de especialistas entrenados en reconocer rasgos morfológicos de los insectos transmisores de la enfermedad lo cual conlleva a una de las principales problemáticas para implementar soluciones efectivas, de ahí que no es estratégico ni informativo para las campañas de control donde se involucra la población afectada (Olivares, 2016). Se podría decir con esto, que brotes epidémicos podrían ser evitados si la comunidad directamente involucrada o la entidad del área de salud tuviera un sistema de identificación capaz de alertar la presencia del vector en las viviendas sin necesidad de esperar la ayuda de un experto o peor aún, la intervención de especialistas posterior a un diagnóstico en un paciente infectado en la zona. Inclusive, este dispositivo serviría de apoyo para la clave taxonómica posterior a la colecta.

Por otra parte, los beneficios del IoT como plataforma que permite reducir las dimensiones físicas, el consumo y la complejidad del hardware (Ruiz Jiménez y cols., 2015) de dispositivos como la nariz electrónica encaminado a la solución de una problemática actual del país, enmarca la investigación hacia la exploración del uso de nuevas tecnologías para implementar soluciones innovadoras ante la ausencia de estrategias precoces y adecuadas para el control de enfermedades transmitidas por insectos como el mal de Chagas. La principal dependencia centralizada de la identificación de los vectores hacia comités de expertos en taxonomía y el tiempo invertido en esa tarea se relaciona con la ineficacia en el diagnóstico de la enfermedad y acciones médicas en los pacientes.

Dada la importancia de incentivar la línea de investigación entomológica basado en narices electrónicas y orientado en la detección no solo del insecto transmisor sino también del vector infectado, se desarrolla en este capítulo una breve explicación de las generalidades de la enfermedad y de los triatominos, seguido por las dos secciones (3.2 y 3.3) que explican el desarrollo del prototipo de la nariz electrónica basándose en la metodología expuesta en los dos capítulos anteriores. A continuación, en la sección 3.4 se nombra el procedimiento que se siguió para realizar la calibración de los sensores a partir de la hoja de datos de los fabricantes.

En la sección 3.5 se presentan las características y condiciones experimentales de laboratorio en la que se realizó la adquisición de datos de cada ensayo. Posteriormente, en la sección 3.6 se detallan las medidas de prueba para las muestras de la clase positiva, es decir, de los tratamientos aplicados sobre la nariz electrónica, como contraparte, en la sección 3.7 se presentan las medidas realizadas para la clase negativa, es decir, el control.

Finalmente, se comparan las respuestas entre sensores plasmándolo en la sección 3.8 según el procesamiento de datos y la validación del aprendizaje de máquina como detector y clasificador no solo de triatominos a nivel de orden taxonómico, sino también a nivel especie infectada y no infectada. Por lo tanto, se presenta en la sección 3.9 la discusión de resultados, conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros en el área a partir de lo observado en el comportamiento de la nariz electrónica.

3.1. IMPORTANCIA EPIDEMIOLÓGICA Y GENERALIDADES DE LOS TRIATOMINOS.

Tripanosomiasis americana, mejor conocida como enfermedad de Chagas o el mal de Chagas, es una infección producida por el parásito protozoario flagelado *Trypanosoma cruzi* que se presenta principalmente en Latinoamérica y habita en lugares con clima tropical. Colombia ocupa uno de los principales países de endemia de la enfermedad y Santander hace parte de los departamentos con mayor frecuencia de casos (Carcavall, Rabinovich, y Tenn, 1985). Esta enfermedad es transmitida por insectos hematófagos, es decir insectos cuyo alimento se basa en la succión de sangre. Esta enfermedad fue descrita por el médico brasileño Carlos Ribeiro Justiniano Chagas en 1909 ((Carcavall y cols., 1985), p. 251) y “la OMS estima que hay unos 16 a 19 millones de personas infectadas y que el 25 % de la población de América Latina habita en zonas de riesgo de infección. Esta enfermedad es considerada como una de las “enfermedades olvidadas” y conlleva un elevado coste económico y social” (Álvarez-Molinero y Aguilar-Naranjo, 2009).

La infección puede causarse a través de la piel con tripomastigotes que provienen de las heces del vector que son dejadas durante la picadura, esta ingresa al organismo a través de excoriaciones de la piel (picadura) o a través de mucosas invadiendo de forma directa las células. Las células infestadas de amastigotes (fase replicativa del protozoario) forman pseudoquistes que al explotar infectan a otra célula reproduciéndose así por todo el cuerpo. Es común que la transmisión al ser humano sea por medio de insectos vectores, sin embargo, existen casos por transfusión de sangre u órganos, uso de jeringas o accidentes de laboratorio, por vía congénita (de madre a hijo) o por vía oral tras el consumo de alimentos contaminados por las heces.

La prevención de esta enfermedad consiste en promover programas de educación sanitaria y conocimiento de los vectores. Sin embargo, la identificación de vectores del mal de Chagas es realizado por personal experto mediante un análisis riguroso, los cuales conocen las características morfológicas externas de cada una de las especies correspondientes a la familia Reduviidae (compuesta de 20 subfamilias diferentes), a la cual pertenece la subfamilia Triatominae, ésta subfamilia contiene las especies vectores del mal de Chagas (Elliot, Cáceres, Guillén, y Nakashima, 1988).

El personal experto en identificación de triatominos hace una inspección visual de los mismos con el fin de encontrar las características que los ubiquen en algunas de las especies establecidas en claves de identificación taxonómica (Hemiptera, 2011). En dicha inspección el experto verifica: ubicación de los ocelos; forma de la cabeza, alargada u ovalada; verificación del primer segmento del rostro, si es tan largo como el segundo o más corto; la posición de las antenas en la cabeza, si son próximas al ápice o lejos; las manchas irregulares en cabeza y patas; manchas en el área del conexivo; tubérculos anteníferos, si son cercanos o no a los bordes de los ojos; el apéndice posterior del escutelo de acuerdo a su forma alargada o corta y otras características (Soto-vivas, 2009).

Por otra parte, los triatominos cuentan con mecanismos de comunicación química, referida a la presencia de sustancias volátiles que promueven comportamientos tales como la agregación, defensa, alarma, sexual (búsqueda de pareja), entre otras. Por ejemplo, se han reportado señales químicas en las heces de diversas especies de triatominos (Schofield y Patterson, 1977) que generan agregación y promueve la atracción por parte de larvas ayunadas. En el caso de los mecanismos activos de alarma y defensa, los adultos emiten un olor 'repugnante' cuando son perturbados y fácilmente es percibido por el olfato humano (Games, Schofield, y Staddon, 1974; Rossiter y Staddon, 1983). "La liberación de las secreciones de las glándulas exocrinas metasternales y de Brindley (ambas presentes únicamente en adultos) ha sido demostrada en condiciones de perturbación mecánica (...) donde la mayoría de volátiles liberados (...) provienen de las glándulas de Brindley. Se ha sugerido que los compuestos emitidos por estas glándulas actuarían como una feromona de alarma en base a la respuesta comportamental de rechazo de *T. infestans* frente al ácido isobutírico, el principal componente de la secreción de glándulas de Brindley" (Zacharias, 2011).

En fin, son múltiples los trabajos que estudian los componentes de estas dos glándulas (la metasternal, que segrega feromonas de cópula y agregación; y de Brindley, para comunicación y alarma) y en general los compuestos de los volátiles emanados por los triatominos. Sin embargo, no existe un trabajo que relacione la huella olfativa con la capacidad de detectar o clasificar triatominos con respecto a otras especies de insectos no vectores.

3.2. PROTOTIPO PARA APLICACIONES EN EL ÁREA DE ENTOMOLOGÍA MÉDICA.

Debido a que la respuesta sensitiva de la nariz electrónica frente a los volátiles emanados por los insectos (tanto de la clase positiva como negativa) son vulnerables al ruido generado por olores externos en el ambiente, y en conjunto con la necesidad de implementar un bajo nivel de flujo y presión por parte de la fase móvil para no generar traumatismos o daños colaterales a las muestras biológicas, el prototipo de la nariz electrónica para el área de entomología médica presenta la principal característica de la ausencia del módulo de muestreo independiente.

Como es preciso determinar si la nariz electrónica tiene la capacidad de diferenciar estos insectos vectores de otros no vectores de la enfermedad de Chagas, se configuró el sistema de Hardware basado en lo expuesto en los capítulos anteriores. El prototipo final presenta la particularidad principal de la combinación entre el módulo de muestreo y el módulo de sensado, por ende, el módulo de energización consta simplemente de la alimentación AC que entrega energía a los convertidores AC/DC (*Alternating Current - Direct Current*) de 5v para la Intel Galileo y los sensores de gas además del digitalizador ADC (*Analog to Digital Converter*). Físicamente el módulo de sensado no se ve afectado con la ausencia del módulo de muestreo al igual

que el módulo de adquisición de datos y comunicación, a excepción de las conexiones de salida de los pines 5, 6 y 7 de la Intel Galileo, los cuales corresponden a la señal control de las electroválvulas.

Por otra parte, gracias a que la nariz electrónica presenta la propiedad de portabilidad y la capacidad de cambio en posición y orientación, se facilitó implementar el prototipo de forma vertical con los sensores girados 180° lo que permitió realizar la adquisición de datos de cada clase (positiva y negativa), como se observa en la figura 29.

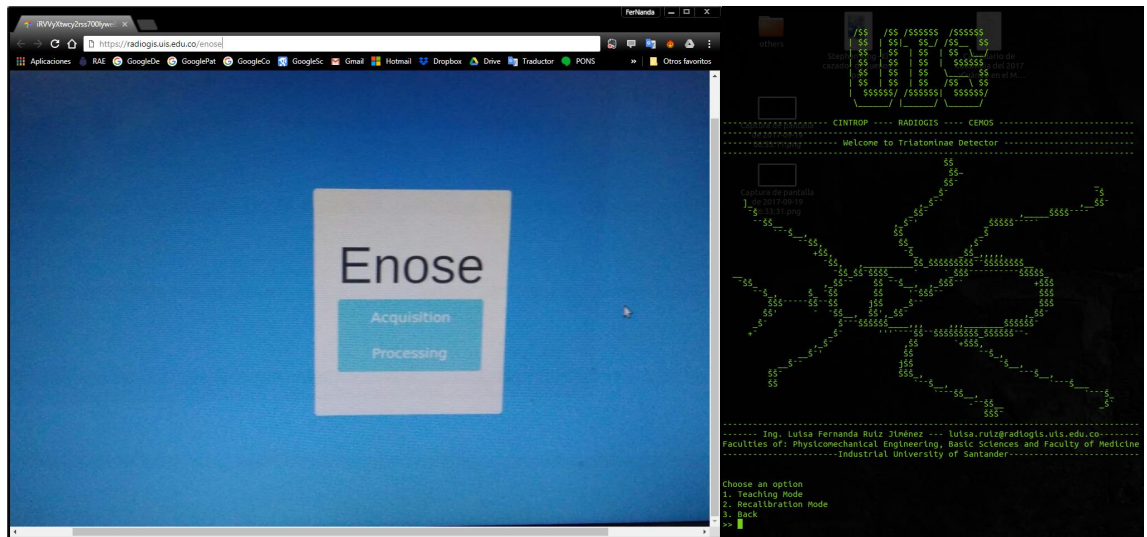
Figura 29. Prototipo de nariz electrónica para identificar insectos vectores del mal de Chagas.



3.3. CONFIGURACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE DATOS.

Teniendo en cuenta que la aplicación de la nariz electrónica para identificar los triatominos se beneficia del concepto de terminal móvil IoT en términos de comunicación, se crea un perfil de usuario para los desarrolladores y otro para el cliente final (investigadores del CINTROP), con su respectiva dirección de base de datos y acceso web, como se observa en la imagen de la izquierda de la figura 30. Al lado derecho se encuentra la imagen del panel de usuario del software local basado en Python y diseñado en líneas de comandos.

Figura 30. Interfaz web básica de usuario de la nariz electrónica como detector de triatominos.



Posteriormente se habilita todas las posibles opciones que se presenta en la etapa de extracción de característica, para que en la etapa de selección de forma transparente se halle la que mayor porcentaje de desviación presente a partir del uso del algoritmo PCA. Para la clasificación de las clases se hace uso de los diferentes *kernel* disponibles, y se escoge la máquina de soporte vectorial con menor error de predicción. Finalmente se aplica el tipo de validación cruzada que permite estimar dicho error *accuracy*.

3.4. MEDIDAS DE CALIBRACIÓN.

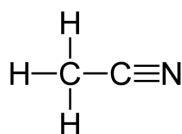
En la sección 1.2.2 se nombran las recomendaciones necesarias para hacer uso de los sensores de gas tanto de la casa de fabricantes *Figaro Engineering* como de *Hanwei Electronics*, por ello se adquieren la respuesta en conductancia de cada sensor en presencia de diferentes solventes de alta concentración. Se escogieron cuatro diferentes compuestos debido a sus propiedades tales como la polaridad y la cantidad de electrones libres capaces de crear enlaces con los oxígenos presentes en el material

de cada sensor, esto con el fin de tener control del desgaste, derivas temporales o problemas causados por medidas en los sensores.

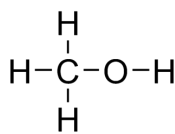
Uno de los compuestos químicos escogido ha sido el acetonitrilo (CH_3CN) que es un líquido incoloro y de uso como disolvente polar aprótico, es decir, que no da ni acepta protones. Generalmente en laboratorio es utilizado como disolvente de polaridad media miscible con agua lo que implica la capacidad de disolver una amplia gama de compuestos iónicos y no polares, por lo cual es provechoso su uso como fase móvil en HPLC (cromatografía líquida de alta eficacia o *high performance liquid chromatography*). Su fórmula estructural corresponde a la mostrada en el ítem a de la figura 31.

Figura 31. Fórmulas estructurales de los compuestos químicos utilizados para la calibración.

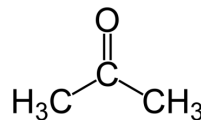
a) Acetonitrilo



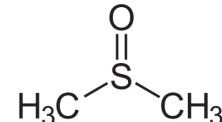
b) Metanol



c) Acetona



d) DMSO



Por otra parte, se escogió un compuesto químico perteneciente a la familia de alcoholes. El metanol (con formula estructural mostrada en el ítem b de la figura 31) es un líquido ligero (de baja densidad), incoloro, inflamable y tóxico que se utiliza como anticongelante y combustible. Gracias a su facilidad de acceso, punto de ebullición de 65°C y principalmente por sus propiedades de disolvente se ha utilizado a un nivel de concentración de aproximadamente 90 % para el estudio de calibración de los sensores.

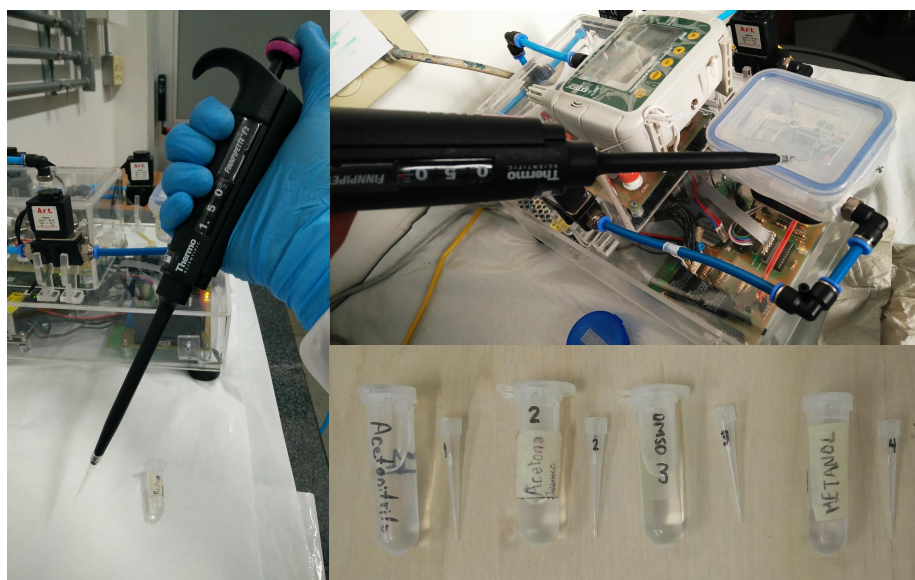
Ya escogido uno de los solventes más usados en la cromatografía de líquida (acetonitrilo) y uno de los alcoholes con nivel de volatilidad manipulable para el caso de la nariz electrónica, se procedió a escoger un compuesto del grupo de las cetonas, la cual correspondió a la acetona. Este compuesto a temperatura ambiente se presenta como un líquido incoloro de olor característico y se evapora fácilmente, es inflamable y es soluble en agua. Su punto de ebullición es a 56°C , siendo más volátil que el metanol. Además, se disuelve fácilmente en el agua por ser un compuesto orgánico polar generando relaciones de momentos dipolo-dipolo atrayendo las cargas parciales del material de los sensores de gas. Igualmente, su forma estructural se observa en el ítem c de la figura 31.

Finalmente, para la preparación de la calibración de los sensores, se usó dimetil-sulfóxido también conocido como DMSO. Este es un líquido orgánico incoloro de fórmula estructural mostrada en el ítem d de la figura 31, y generalmente es usado como disolvente orgánico industrial. Es un disolvente aprótico y altamente polar, lo

que indica su miscibilidad tanto con el agua como con disolventes orgánicos como alcoholes, cetonas etc. Su punto de ebullición es 189°C, es decir, es poco volátil, lo que permite extraer información de los sensores de gas respecto a la respuesta en presencia de baja concentración de volátiles sobre el volumen de sensado.

A diferencia de la configuración del hardware de la nariz electrónica para sensar insectos, se utilizó el diseño mostrado en la figura 20 en combinación a la célula de bombeo CB03 por la propiedad de utilizar un motor seco (libre de aceite). Además, se realizaron pruebas a diferentes cantidades de cada solvente: 0.5uL, 1.0uL, 1.5uL y 2.0uL (sobre un volumen de 180ml dados por las cámaras de referencia RE3); medidos con una pipeta de la marca *Finnpipette F2* de volumen variable y capacidad de 0.5 a 2.0 uL, como se observa en la figura 32.

Figura 32. Pipeta utilizada en el proceso de calibración de los sensores y compuestos químicos



El procedimiento consistió básicamente en crear una lista aleatoria entre los cuatro compuestos químicos en cada una de las cantidades, cada una con 3 repeticiones, constituyendo un total de 48 paquetes de datos, además de adquirir durante 16 días no consecutivos datos del ambiente y de acción inicial (encendido de los sensores). Esta base de datos que compone la fase de calibración se encuentra alojada en el *data base* de la plataforma bajo la etiqueta *calibration mode* y con acceso en el perfil de desarrollador con fines de mantenimiento de la nariz electrónica.

La temperatura en la que se realizó la adquisición de dichos datos fue entre 24°C a 29°C y nivel de humedad relativa entre 47% a 68%. La muestra se colocó sobre una lámina de vidrio rectangular (portaobjetos) para evitar el contacto directo de la caja de muestras con el solvente y así contaminar la siguiente adquisición de datos, de todas formas, se aseguraba la limpieza total de los sensores garantizando que la conductancia llegara a su estado basal, para ello el tiempo de limpieza.

3.5. PREPARACIÓN DE MUESTRAS.

Con el fin de establecer el punto de partida para el diseño de experimentos, se realizó una serie de medidas preliminares con el modelo presentado en la figura 20 con fase móvil la célula de bombeo CB02, puesto a que no se conocía con certeza el comportamiento de los sensores frente a individuos de la subfamilia Triatominae. Para ello, se generaron tres tratamientos diferentes como se resumen en la tabla 4.

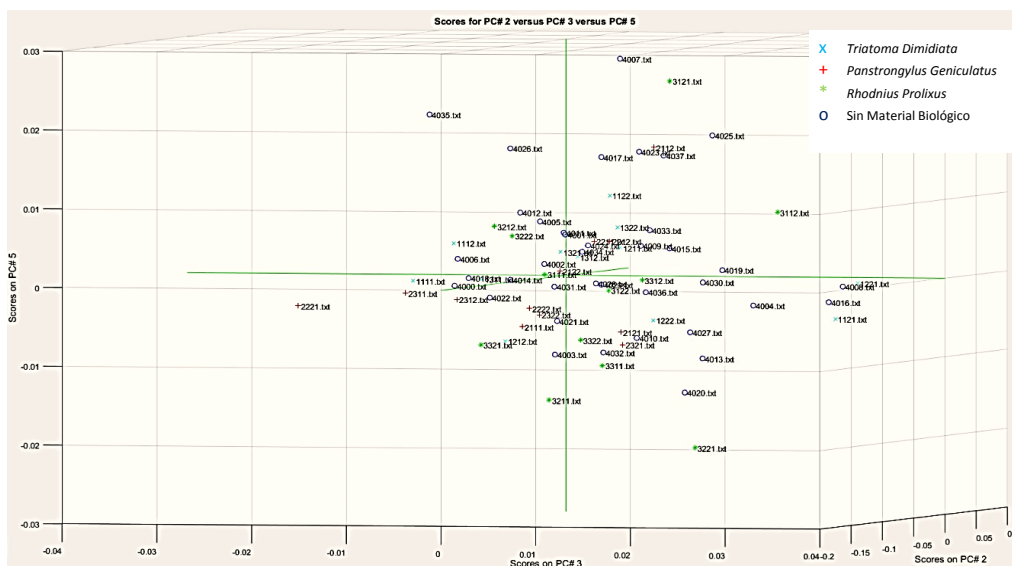
Tabla 4. Especificaciones de la experimentación preliminar con tres diferentes especies de triatominos.

FECHA		Día 1: 20 febrero de 2017	Hora: 9:30 – 13:00				
CONDICIONES AMBIENTALES		Día 1: 28 ± 1.2°C	68% ± 3.4% HR				
CONDICIONES DE ADQUISICIÓN		Fuente fase móvil:	Célula de bombeo CB02				
ELEMENTOS MUESTRA		Tiempo de concentración:	60s				
CANTIDAD DE PAQUETES DE DATOS		Tiempos de adquisición:	120s				
		Tiempo de limpieza:	60s				
		Cantidad de individuos:	3 de cada especie				
		Sexo:	Hembras				
		Estadio:	Adultas				
		Especies:	<i>Triatoma Dimidiata</i> <i>Pastrongylus Genticulatus</i> <i>Rhodnius Prolixus</i>				
		Datos tomados día 1:	41 Paquetes de datos				
		Datos tomados día 2:	33 Paquetes de datos				
Clase	SUBCLASES	Intracalse	Descripción	Repetición Aleatoria	Repetición Instantánea	Total	
1	1	1	<i>Triatoma Dimidiata</i> 1 Hembra adulta alimentada el sábado 18 de febrero de 2017	2	2	4	
		2	<i>Triatoma Dimidiata</i> 2 Hembra adulta alimentada el sábado 18 de febrero de 2017	2	2	4	
		3	<i>Triatoma Dimidiata</i> 3 Hembra adulta alimentada el sábado 18 de febrero de 2017	2	2	4	
	Total subclase 1						12
	2	1	<i>Panstrongylus Genticulatus</i> 1 Hembra adulta alimentada el viernes 17 de febrero de 2017	2	2	4	
		2	<i>Panstrongylus Genticulatus</i> 2 Hembra adulta alimentada el viernes 17 de febrero de 2017	2	2	4	
		3	<i>Panstrongylus Genticulatus</i> 3 Hembra adulta alimentada el viernes 17 de febrero de 2017	2	2	4	
	Total subclase 2						12
	3	1	<i>Rhodnius Prolixus</i> 1 Hembra adulta alimentada el viernes 17 de febrero de 2017	2	2	4	
		2	<i>Rhodnius Prolixus</i> 2 Hembra adulta alimentada el viernes 17 de febrero de 2017	2	2	4	
		3	<i>Rhodnius Prolixus</i> 3 Hembra adulta alimentada el viernes 17 de febrero de 2017	2	2	4	
	Total subclase 3						12
Total con material biológico						36	
2	4	0	Sin Material Biológico			38	
TOTAL						74	

Los primeros resultados de los sensores de la nariz electrónica los cuales correspondían en su mayoría a sensores de la casa Hanwei mostraron una baja sensibilidad tanto en presencia como en ausencia de cualquier tratamiento. Estos resultados

fueron pasados a través del módulo de PCA (análisis de componentes principales) para conocer el nivel de separabilidad visualmente, los cuales se presentan en la figura 33. Se aplica el algoritmo de PCA sobre características Gmax-Gmin/Gmax y Normalización centrado, es concluyente que no se obtienen clústeres de separación.

Figura 33. Resultados del análisis de componente principal (PCA) de los datos de calibración.



Debido a la baja determinación de los sensores para evaluar la presencia o ausencia del insecto, se prosiguió realizar la compra de sensores de la casa Figaro, los cuales presentan (según su hoja de datos) mayor sensibilidad en comparación a los sensores de la casa Hanwei. Por otra parte, durante la calibración de dichos sensores se logró observar que la presencia de un flujo de aire activo dado por una fuente como la célula de bombeo CB02 genera una respuesta en conductancia de los sensores alta, lo que significa que el olor que emanan los triatominos era “contaminado” hasta el punto de volver indeterminada la respuesta de los sensores. Ante esta evaluación preliminar y teniendo en cuenta la hipótesis de este trabajo de investigación, se decidió realizar el diseño de experimentos con cabinas de alta densidad poblacional de triatominos, combinar el módulo de muestreo con el módulo de sensado y por ende eliminar la fase móvil, es decir, no hacer uso de ninguna célula de bombeo.

Gracias al estudio anterior, se especificó la preparación de muestras para el desarrollo experimental, la cual consiste en el uso de colonias completas que se encuentran aisladas en el insectario del centro de investigaciones CINTROP, los cuales cuentan con colonias de especímenes no infectados e infectados. Los profesionales y técnicos calificados del grupo son los encargados de realizar las labores de mantenimiento, alimentación, seguimiento de ciclo biológico y experimentación.

Para cada especie de triatominos existen diferentes colonias que se encuentran en frascos plásticos de boca ancha, como se observa en la figura 34. Los elementos con

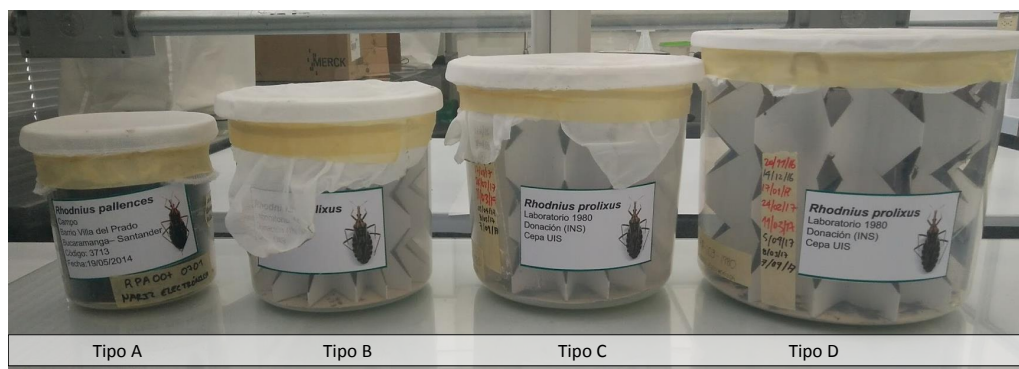
la que cuenta son una base de cartón que permite recoger fácilmente los desechos biológicos generados por los individuos, tales como heces, exuvias o cadáveres, además de un cartón en forma de abanico con agujeros hexagonales o circulares que les permite transitar a través de la colonia. Esta forma de abanico se debe a la característica comportamental de defensa puesto a que estos buscan principalmente lugares como esquinas, bordes o grietas. Finalmente para mantener los individuos dentro del recipiente, se coloca sobre la boca del frasco un tejido ligero con estructura abierta en forma de red ('velo tul') de color blanco (para generar contraste y observar fácilmente los triatominos) y de distancia máxima entre los hilos de la trama de 1.5mm, se asegura la tela con un caucho grueso y cinta en mascarar alrededor, esto con el fin de evitar el escape del material biológico.

Figura 34. Componentes de los contenedores de las colonias de triatominos del CIN-TROP.



En el insectario se manejan cuatro tipos de tamaño de contenedores, el tipo A corresponde al volumen más pequeño siendo este de 1.14lt (11cm de diámetro por 12cm de alto), seguido por el tipo B de 2.31lt con dimensiones de 14.5cm de diámetro y 14cm de alto, el tipo C corresponde a 3.63lt de volumen, 17cm de diámetro y 16 de alto. Finalmente el tipo D tiene 5.65lt de volumen y 20cm de diámetro por 18cm de alto. Estos se pueden observar en la figura 35.

Figura 35. Tamaños de los contenedores de las colonias de triatominos en el CIN-TROP.



Los ejemplares utilizados fueron machos y hembras de diferentes estadios de 12 especies diferentes de triatominos, estas especies se describen en la tabla 5, conformando así la clase positiva, es importante notar que se ha agregado un tratamiento con especímenes infectados pertenecientes a la especie *Rhodnius pallensces*. Por otra parte, la clase negativa se conforma por individuos de las especies *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) y *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) los cuales pertenecen a otros órdenes taxonómicos. Además, como control negativo se tomaron datos con la nariz electrónica del ambiente y de los elementos individuales que conforman las colonias (frasco vacío, frasco vacío + base de cartón, frasco vacío + base + acordeón de cartón y frasco vacío + base + acordeón de cartón + tela tul).

Tabla 5. Descripción de los tratamientos implementados en el diseño de experimentos.

Núm. tratamiento	Especie	Nombre referencia	Cantidad Contenedores	Tamaño contenedores	Cantidad Réplicas	Cantidad Repeticiones	TOTAL
01	<i>Panstrongylus geniculatus</i>	PG00+	3	C-C-C	3	3	27
02	<i>Triatoma dimidiata</i>	TD00+	3	C-D-B	3	3	27
03	<i>Triatoma dimidiata</i> ojos rojos	TDOR00+	1	D	3	3	9
04	<i>Triatoma pallidipennis</i>	TP00+	1	D	3	3	9
05	<i>Triatoma maculata</i>	TM00+	3	B-C-D	3	3	27
06	<i>Rhodnius colombiensis</i>	RC00+	1	D	3	3	9
07	<i>Rhodnius pallescens</i>	RPA00+	4	A-C-D-C	3	3	36
08	<i>Rhodnius prolixus</i>	RPR00+	4	A-D-C-C	3	3	36
09	<i>Rhodnius prolixus</i> ojos rojos	RPROR00+	2	D-D	3	3	18
10	<i>Eratyrus mucrunatus</i>	EM00+	2	B-B	3	3	18
11	<i>Rhodnius pallescens</i> infectada	RPIN00+	3	B-D-B	3	3	27
TOTAL CLASE POSITIVA							243
12	<i>Aedes aegypti</i>	AE00+	1	RE1A (figura 17)	3	3	9
13	<i>Sitophilus oryzae</i>	SITO00+	1	G	3	3	9
14	Tratamiento de control	LIMP00+	N/A	N/A	--	--	223
TOTAL CLASE NEGATIVA							241

Por otra parte, todos los datos adquiridos fueron tomados desde las 5:00pm hasta las 10am del día siguiente, con el fin de abarcar la mayor parte de actividad producida por los triatominos (Núñez, 1987; Lazzari, 1992; Lorenzo Figueiras et al., 1994; Lorenzo y Lazzari, 1996), puesto a que en la noche aumenta el comportamiento de búsqueda de alimento, pareja, refugio entre otros.

Para obtener los niveles de temperatura y humedad se utilizó el medidor de marca *Extech Instruments* y referencia 42280. Su ubicación siempre fue lo más cerca posible a los sensores y la medición, como se observa en la figura 36.

Figura 36. Sensor de temperatura y humedad utilizado en la experimentación.



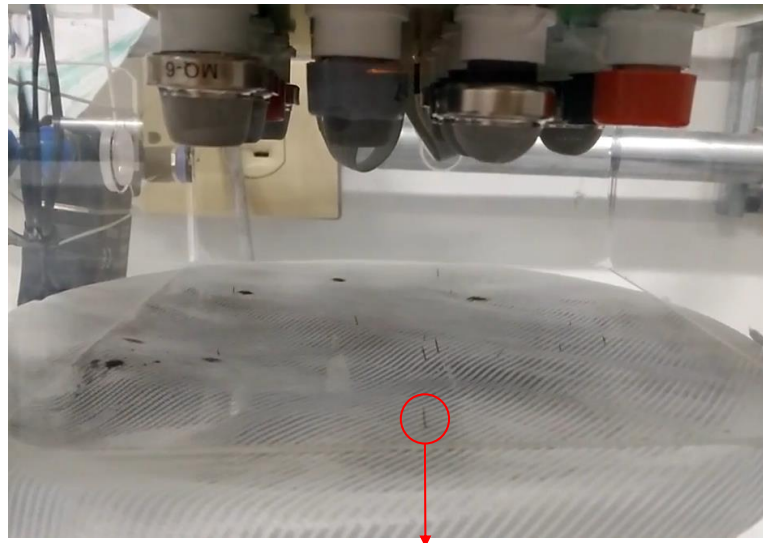
3.6. MEDIDAS CON LAS DIFERENTES ESPECIES DE CLASE POSITIVA.

Se realizaron medidas con las 8 diferentes especies de triatominos: *Panstrongylus geniculatus*, *Triatoma dimidiata* y su variación genética *Triatoma dimidiata* ojos rojos, *Triatoma pallidipennis*, *Triatoma maculata*, *Rhodnius colombiensis*, *Rhodnius pallescens* sin el parásito y *Rhodnius pallescens* infectado, *Rhodnius prolixus* y su variación genética *Rhodnius prolixus* ojos rojos, y por último, *Eratyrus mucrunatus*.

Luego de establecer una lista aleatoria para obtener dichas medidas, se prosiguió a realizar la adquisición de 1000 muestras de datos, lo que equivale a un tiempo aproximado de 5 minutos durante una variación de temperatura entre 22.7°C 23.8 °C y niveles de humedad relativa entre 72.5 % 77.7 %, durante las horas de la noche desde las 5:00 pm a 7:00 am en la semana del 18 al 26 de octubre de 2017.

Durante la aplicación de todos los tratamientos, sin excepción alguna, se observó en los triatominos un comportamiento respuesta ante el estímulo calorífico que se genera en la cámara de sensores, esto se debe a que en distancias cortas, la clave térmica (el calor emitido por un hospedador de sangre caliente) es un estímulo suficiente y necesario que les permite a los insectos orientarse y desencadenar la respuesta de picado (Flores y Lazzari, 1996). Es por ello que en la imagen de la figura 37 se puede apreciar la probóscide o trompa de los triatominos a través de la tela tul.

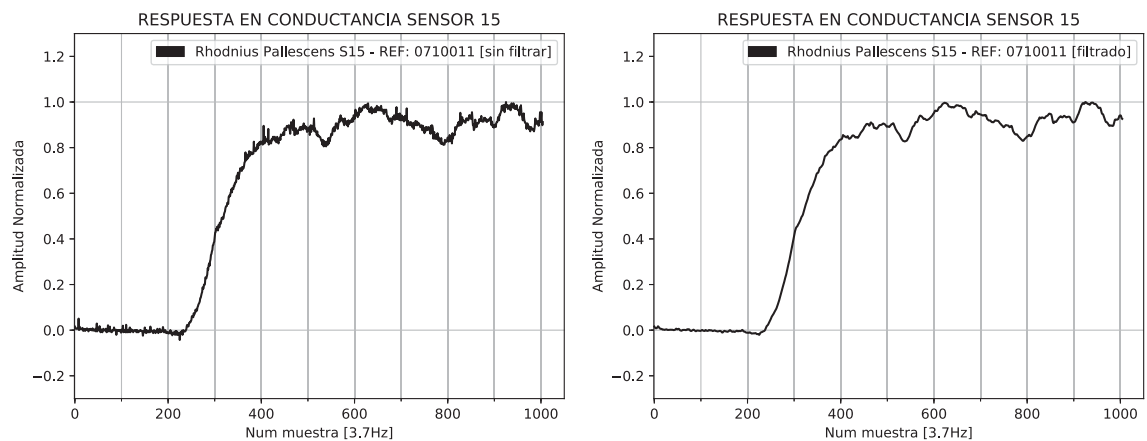
Figura 37. Respuesta comportamental de los triatominos durante los tratamientos.



Probóscide o trompa

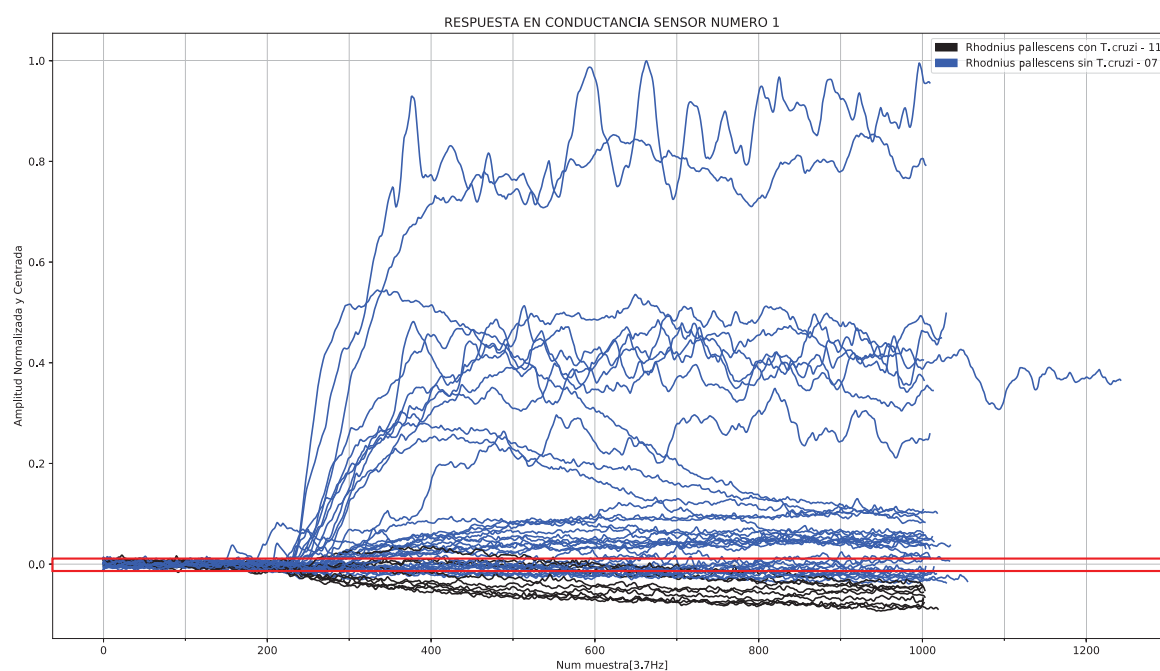
Ante la respuesta por parte de los triatominos, los sensores captaron a través de la variación de conductancia la huella olorífica generados por los infoquímicos concentrados en el volumen del contenedor de la colonia, esta respuesta se puede observar en la figura 38, donde se aprecia el cambio de oxidación en el sensor 15 (TGS826) ante el tratamiento de *Rhodnius pallescens* no infectado de la colonia tipo C con numero de referencia D0701011, que corresponde a la réplica y repetición número uno. La imagen a la izquierda es la señal sin pasar por el filtro Butterworth (explicado en la sección 2.2) y a la derecha luego del filtrado digital. Además la señal se encuentra centrada con respecto al eje horizontal, es decir, se halla el valor medio de las primeras 200 muestras (Go) y posteriormente se hace el corrimiento respectivo. Además se encuentra normalizada la amplitud.

Figura 38. Respuesta en conductancia del sensor 15 ante *Rhodnius pallescens* no infectado.



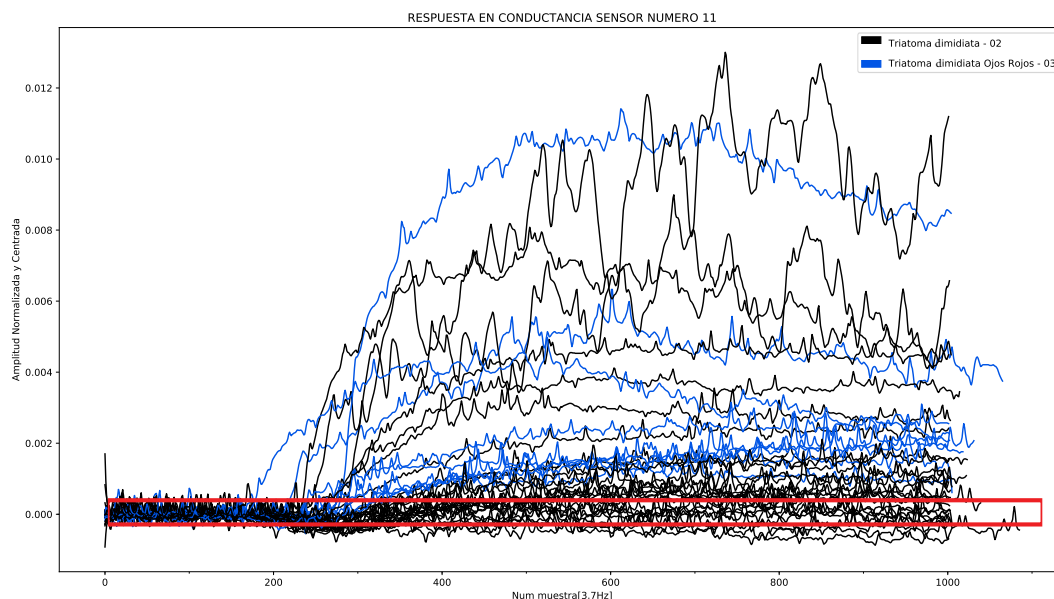
A modo de ejemplificar las respuestas de los sensores ante los diferentes tratamientos, se presenta en la figura 39 la variación de la conductancia del sensor 1 (MQ-2) con los tratamientos *Rhodnius pallescens* no infectado versus *Rhodnius pallescens* infectado, presentándose que para el caso no infectado la conductancia aumenta y el infectado la conductancia disminuye. La franja de color rojo alrededor del punto cero en el eje de amplitud muestra la línea base del sensor, es decir, las variaciones naturales (mostradas en la sección 1.2.2) asociadas a factores externos.

Figura 39. Respuesta en conductancia del sensor 1 ante *Rhodnius pallescens* infectado y no infectado.



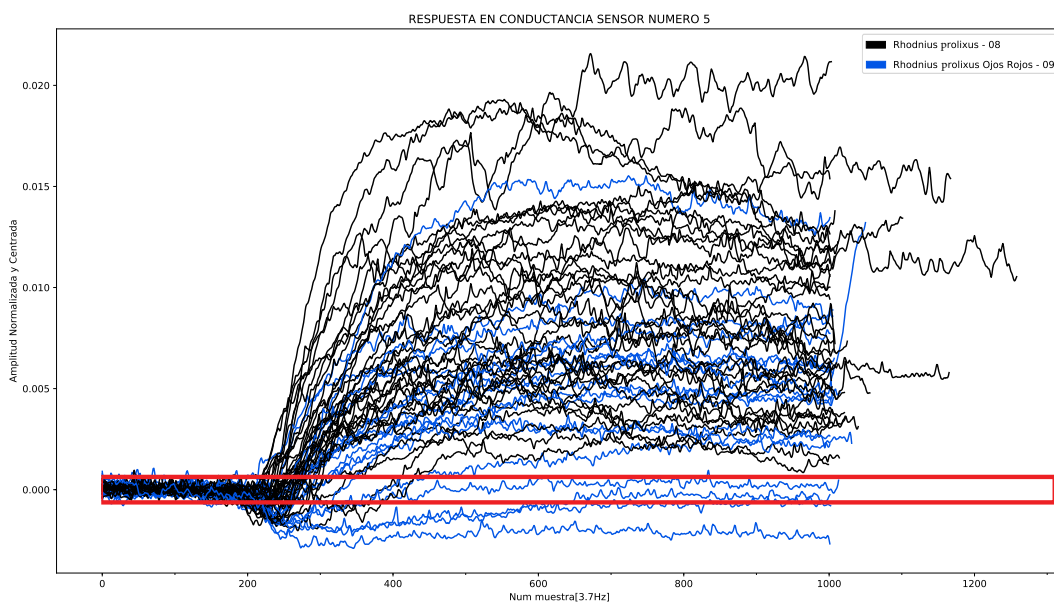
En la imagen de la figura 40 se puede observar los valores de conductancia del sensor 11 (TGS823) de los tratamientos referidos a *Triatoma dimidiata* y su alteración genética *Triatoma dimidiata* ojos rojos, de los cuales se observa poca separabilidad entre las respuestas. Esto indica que naturalmente la mutación o el gen autosómico no presenta variabilidad en los volátiles emanados por los especímenes medible con la nariz electrónica. Para ambos casos (con o sin la mutación), la conductancia aumenta dependiendo del contenedor medido, es decir, el volumen y densidad poblacional tratada.

Figura 40. Respuesta en conductancia del sensor 11 ante *Triatoma dimidiata* y *Triatoma dimidiata* ojos rojos.



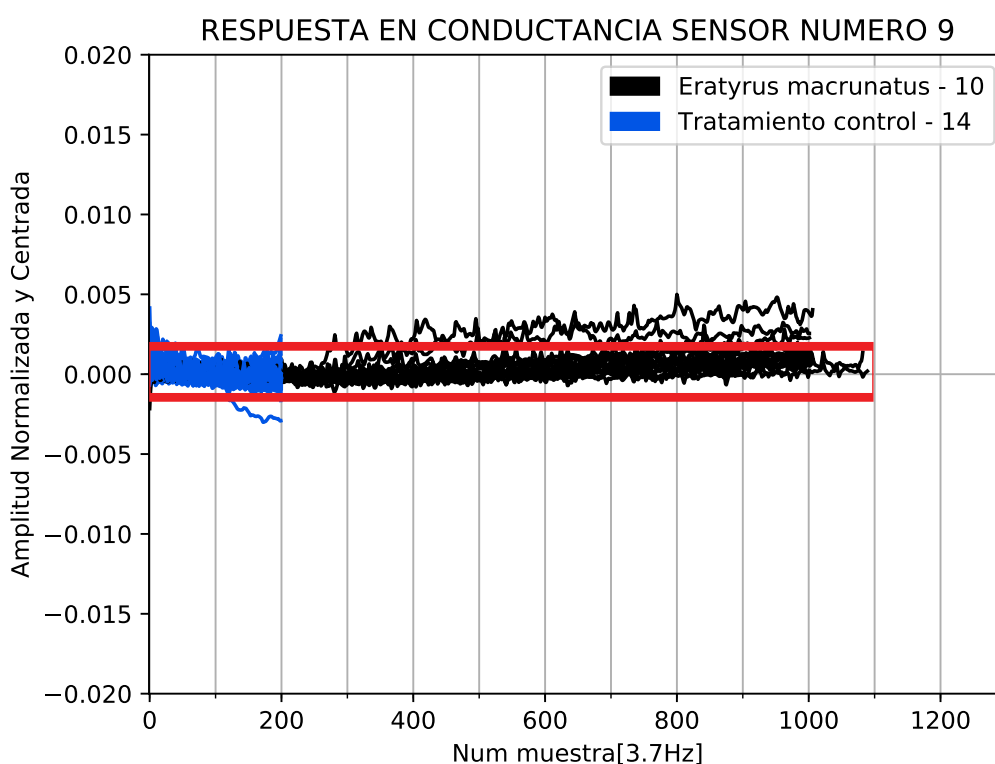
Por otra parte, se presenta en la figura 41 la respuesta del sensor 5 (MQ-7) en presencia de las colonias correspondientes a *Rhodnius prolixus* y su variación genética *Rhodnius prolixus* ojos rojos. Se puede apreciar que existe poca separabilidad entre las pruebas realizadas, y que la variación de los niveles de conductancia corresponde a la relación volumen-densidad poblacional dentro de las colonias. Además, al igual que en el caso de los especímenes de *Triatoma Dimidiata* los niveles de conductancia tienden a incrementar.

Figura 41. Respuesta en conductancia del sensor 5 ante *Rhodnius prolixus* y *Rhodnius prolixus* ojos rojos.



Debido a la disponibilidad de los factores de los tratamientos en el laboratorio de CINTROP, para el caso de estudio correspondiente a la especie *Eratyrus macrunatus* existía una baja densidad poblacional, al punto en que uno de los contenedores albergaba un aproximado de 5 adultos y el otro 8 adultos, lo que indica que las pruebas realizadas para esta especie no fueron satisfactorias. Como se observa en la figura 42, no existen valores de conductancia para el sensor numero 9 (MQ-135) que permitan generar puntos de separabilidad con respecto a la respuesta del tratamiento control (color azul), los cuales corresponden a 200 muestras estables de los sensores, lo que permite generar los limites de línea base sensorial. Este comportamiento se obtuvo en todos los 16 sensores.

Figura 42. Respuesta en conductancia del sensor 9 ante *Eratyrus macrunatus* y tratamiento control.



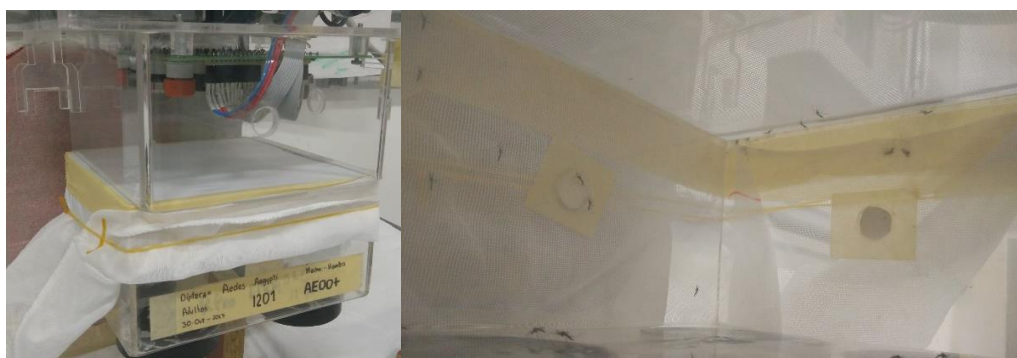
Es posible acceder a la página web del servicio de la nariz electrónica y observar detenidamente la respuesta de cada uno de los 16 sensores así como su relación entre señales adquiridas.

3.7. MEDIDAS DE CLASE NEGATIVA.

Por otra parte, se utilizaron machos y hembras adultos de la especie *Aedes aegypti* al igual que *Sitophilus oryzae*. Como el objetivo de la investigación está orientada a la caracterización de los volátiles emanados por los triatominos y encontrar diferencias clasificatorias con respecto a olores emitidos por insectos de diferente orden taxonómico, no se enfatiza en particularizar la clase de confusión.

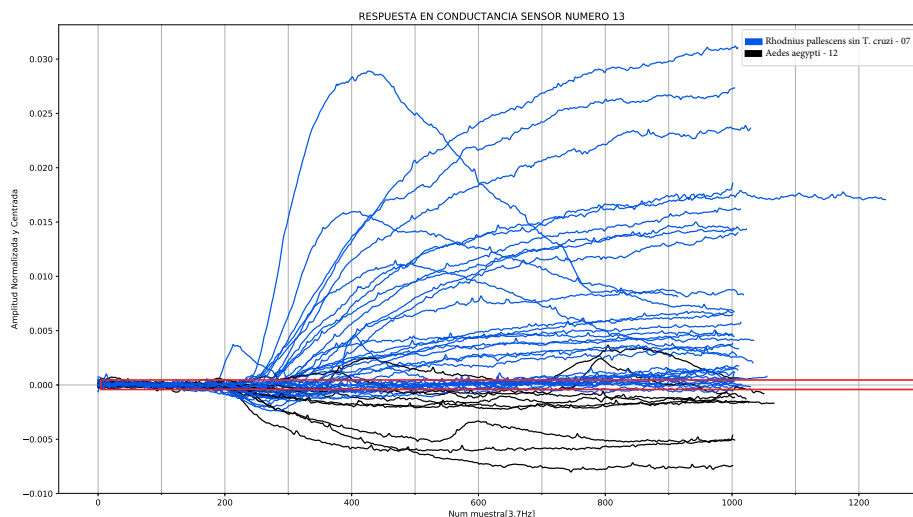
Durante la aplicación del tratamiento relacionado con la especie *Aedes aegypti*, la cual corresponde a 9 paquetes de datos adquiridos, se observó un comportamiento regular de los zancudos, eventualmente realizaban vuelo y posaban sobre las paredes y el tul del contenedor. A diferencia con los triatominos, estos individuos fueron extraídos de las colonias originales y colocados sobre la caja de muestras de referencia RE1A. La experimentación se realizó con 23 individuos de la especie (entre machos y hembras), en la figura 43 se puede apreciar la vista del exterior e interior del contenedor al momento de realizar las pruebas.

Figura 43. Respuesta comportamental de los individuos de la especie *Aedes aegypti* durante el tratamiento.



En el caso de medición del tratamiento de la clase negativa correspondiente a los especímenes de *Aedes aegypti*, los resultados de los sensores son significativos, puesto a que la conductancia en diferentes sensores marcaron un comportamiento descendente, diferente a las medidas con los triatominos. En la figura 44 se puede observar la respuesta del sensor 13 (TGS-822) donde se compara la respuesta con un tratamiento de la clase positiva, en este caso con *Rhodnius pallescens* sin el parásito. Esto indica claramente que los volátiles emanados por los dos especímenes causan reacciones contrarias sobre el sensor.

Figura 44. Respuesta en conductancia del sensor 13 ante *Aedes aegypti* y *Rhodnius pallescens* no infectado.



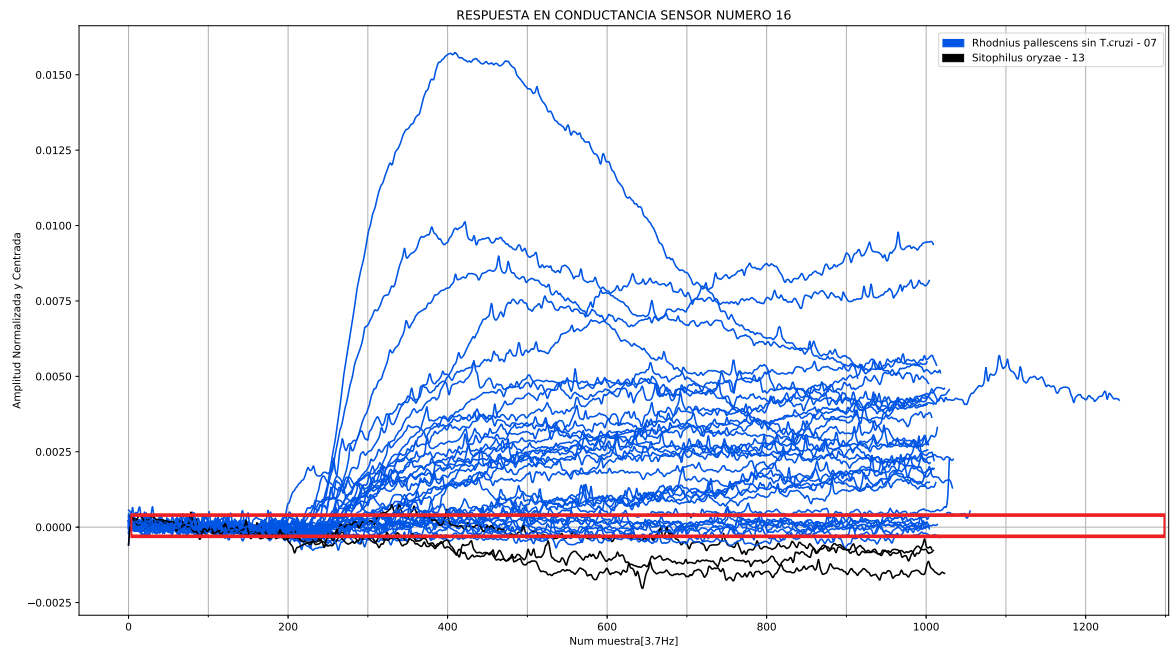
En el caso de la colonia de *Sitophilus oryzae*, también llamados gorgojos de arroz, se mantuvieron durante la adquisición de datos en un contenedor de tamaño 21 cm de alto y 18 cm de diámetro, es decir, un volumen de 5.34Lt de los cuales 3.56Lt permanecieron llenos de arroz blanco, simulando su hábitat natural. Durante la experimentación se observó agregación sobre los bordes del contenedor justo después de terminar la adquisición de datos. Algunos individuos abandonaban el arroz del fondo y se desplazaban hacia la fuente de calor (sensores) quedando atrapados en la tela tul, como se puede apreciar en la figura 45. Es posible asociar la respuesta de los sensores a esta particularidad del comportamiento de los gorgojos, pues el uso de semioquímicos por parte de los insectos contiene un mensaje sexual, de agregación, alimentación, reproducción, etc. Es importante tener en cuenta que la temperatura óptima de crecimiento poblacional está entre 25°C a 33°C, mismo rango de temperatura generada por los sensores en el volumen de la cámara de sensado.

Figura 45. Respuesta comportamental de los individuos de la especie *Sitophilus oryzae* durante el tratamiento.



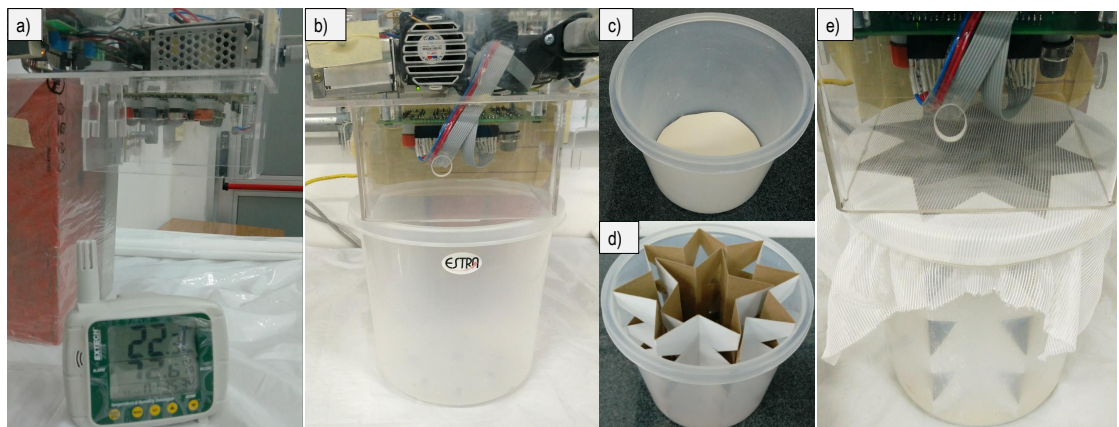
Al igual que en los ejemplos anteriores, en la figura 46 se observa las respuestas en conductancia del sensor numero 16 (MQ-3) ante los tratamientos de *Rhodnius Pallescens* no infectado y *Sitophilus oryzae*. Esta respuesta corresponde al sensor de menor variación en conductancia a comparación de la respuesta de otros sensores, es decir, la nariz electrónica identificó que volátiles en el contenedor de los gorgojos son diferentes a los de las especies de triatominos, sin importar la procedencia de dichos olores.

Figura 46. Respuesta en conductancia del sensor 16 ante *Sitophilus oryzae* y *Rhodnius pallescens* no infectado.



Por último, se realizan medidas de referencia con los contenedores vacíos de los triatominos a diferentes volúmenes y con cada uno de sus componentes (base de cartón, abanico y tul), además de los datos correspondientes al ambiente. Como evidencia se observa en la figura 47 fotografías de cada una de las muestras que componen el tipo de tratamiento numero 14 (según la tabla 5, es decir, el tratamiento control).

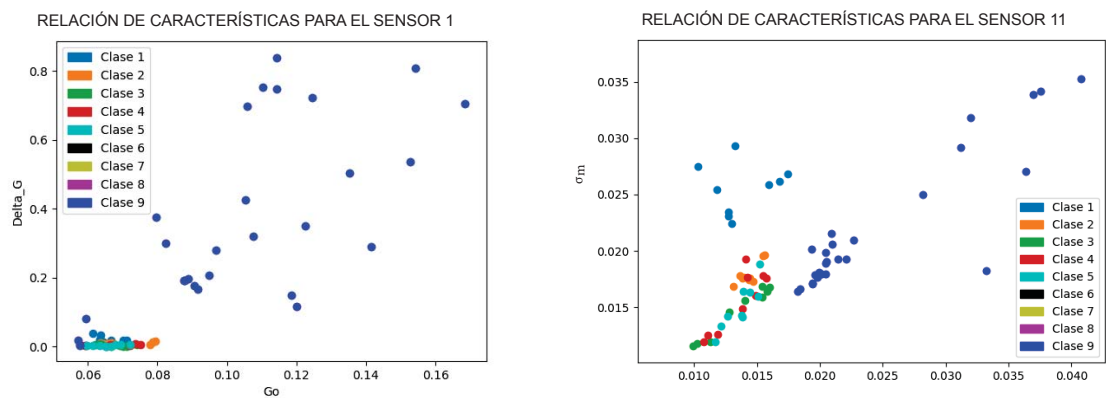
Figura 47. Diferentes factores del tratamiento numero 14 correspondiente a la clase negativa.



3.8. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN

Según los resultados obtenidos en las señales de conductancia de los 16 sensores en cada uno de los tratamientos (con sus respectivos factores), se hallan los valores correspondientes a las características que permitan representar la mayor información posible. Para ello, se utilizan todas las combinaciones de los parámetros mostrados anteriormente en la tabla 3. El resultado de dicha comparación se puede observar en la figura 48 donde se muestra para el sensor S1 (MQ-2) y S11 (TGS-826) la separabilidad de las características de tratamientos.

Figura 48. Relación entre características extraídas de para los primeros 9 tratamientos de los sensores 1 y 11.



Sin embargo, al hallar los valores de PCA de cada uno de los sensores en referencia a los 12 parámetros, se encontró que μ_m , σ_m , μ_o y σ_o recopilaban la mayor cantidad de información relevante. Este resultado se muestra en los valores de PCA mostrados en la imagen del software de comandos de líneas en la figura 49.

Figura 49. Imagen del software local de la nariz electrónica indicando los valores de PCA para cada sensor.

```

Procesando datos del sensor S1:
Numero de PC      Valor de PC      %Varianza del PC  %Varianza Total
0                  0.341470213658  88.7010230402     88.7010230402
1                  0.0271595514161  7.05502236965     95.7560454099
2                  0.0143227077058  3.72049676779     99.4765421777
3                  0.0014245047981  0.370032371386    99.8465745491
4                  0.00059063830065  0.153425450944    100.0
5                  3.08148791102e-33  8.00453800247e-31  100.0
6                  -3.86502445418e-17  1.00398690559e-14  100.0

Procesando datos del sensor S10:
Numero de PC      Valor de PC      %Varianza del PC  %Varianza Total
0                  0.31862270841   89.1629893263     89.1629893263
1                  0.0262224177247  7.33804932912     96.5010386554
2                  0.0107391752856  3.00523768737     99.5062763427
3                  0.00121290549597  0.339417991676    99.8456943344
4                  0.000546408975229  0.152986419851    99.9986007543
5                  5.00018523469e-06  0.00139924572525  100.0
6                  1.80188185969e-21  5.042364175e-19   100.0

Procesando datos del sensor S11:
Numero de PC      Valor de PC      %Varianza del PC  %Varianza Total
0                  0.232531213417  76.3941629518     76.3941629518
1                  0.0371174550494  12.1943065953     88.5884695471
2                  0.0298713646622  9.81372724222     98.4021967713
3                  0.00429848783654  1.41219484217     99.8143916135
4                  0.000546408975229  0.152986419851    99.9986007543
5                  5.00018523469e-06  0.00139924572525  100.0
6                  1.80188185969e-21  5.042364175e-19   100.0

```

Posteriormente, al seleccionar los mejores parámetros para cada sensor, se aplicó de nuevo análisis de componentes principales (PCA) para reducir la dimensionalidad. Se considera que escoger las primeras 5 características, lo que equivale al 93.51 % de varianza total recopilada. Los primeros 14 PC's se pueden observar en la figura 50.

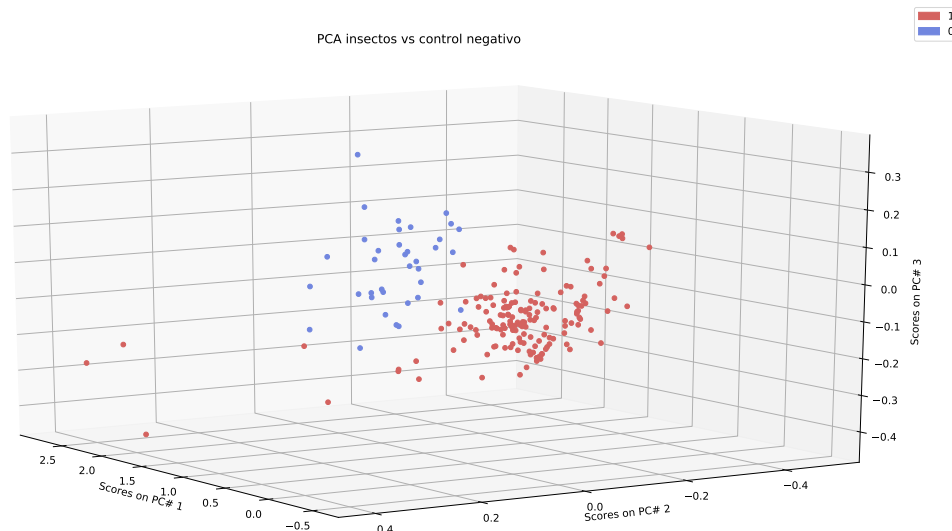
Figura 50. Imagen del software local de la nariz electrónica indicando los valores de PCA para la reducción de dimensionalidad.

```

Procesando datos completos
Numero de PC      Valor de PC      %Varianza del PC      %Varianza Total
0      0.814645167068      78.2146043662      78.2146043662
1      0.0739314847029      7.09820920813      85.3128135743
2      0.0412803904941      3.96335673628      89.2761703106
3      0.0228136600369      2.19035411498      91.4665244256
4      0.0212868742259      2.04376643117      93.5102908567
5      0.0123686864085      1.18752550568      94.6978163624
6      0.011891865445      1.14174561951      95.8395619819
7      0.00674583773104      0.647672202059      96.487234184
8      0.00643169696371      0.617511345744      97.1047455297
9      0.00480643729635      0.46146912391      97.5662146536
10     0.00347373007787      0.333515050108      97.8997297038
11     0.00313000575266      0.300513857449      98.2002435612
12     0.00237280054353      0.227814100242      98.4280576614
13     0.00227564977409      0.218486592631      98.6465442541
14     0.00167663157771      0.160974471855      98.8075187259
    
```

Finalmente, aunque el problema de clasificación sea multi-clase, se trabajó bajo la metodología de dos-clases con el fin de especificar los tratamientos más fáciles de separar y poco a poco avanzar en el proceso de separación de clases. En primera instancia, se separa del grupo completo de datos los correspondientes al tratamiento de *Rhodnius pallensces* no infectado. Para lo cual se obtuvo una gráfica tridimensional de los valores de PCA mostrados en la figura 51. En esta se puede observar claramente los dos clúster de grupos de datos.

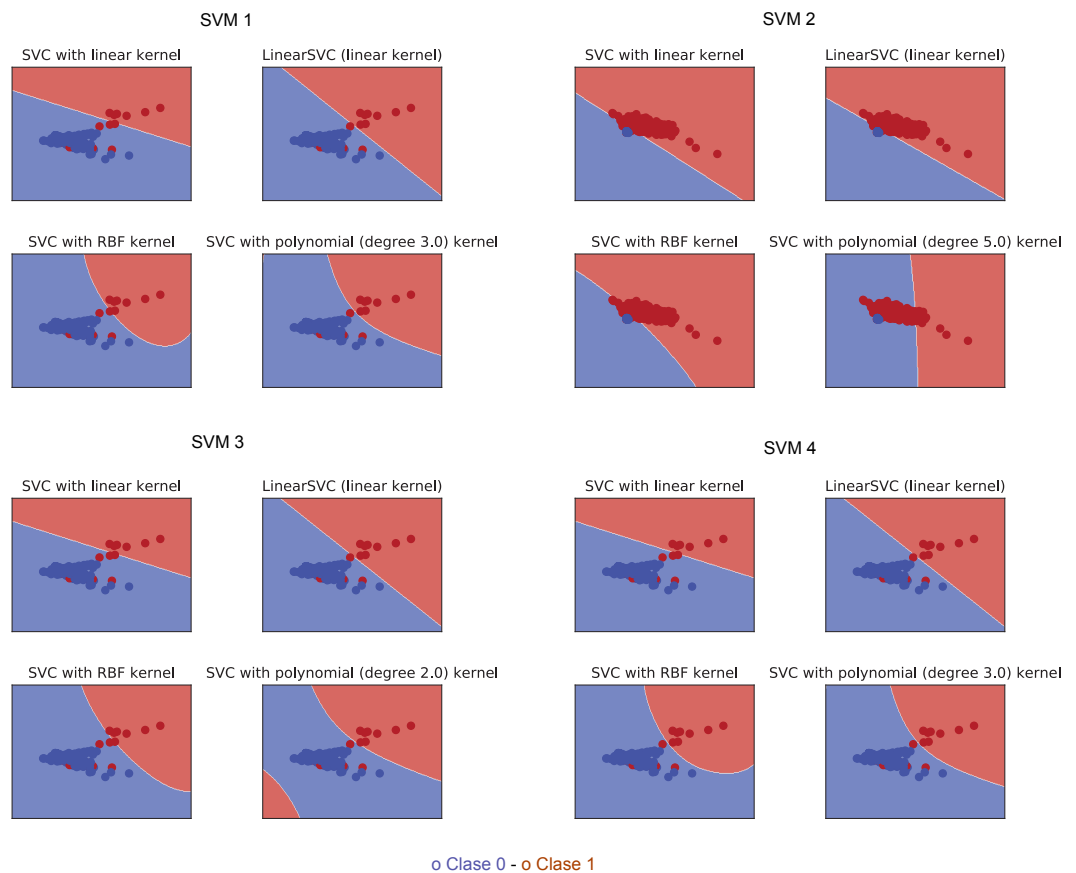
Figura 51. Imagen del software local de la nariz electrónica indicando los valores de PCA para la reducción de dimensionalidad.



En consecuencia, la máquina de soporte vectorial que menor error *accuracy* ha entregado en la configuración explicada en la sección 2.2.4, ha sido del *kernel LinearSVC*. Un ejemplo de las primeras máquinas de soporte vectorial entrenadas se pueden

observar en la figura 52, donde para el caso de SVM 1 la clase 1 de color rojo es el tratamiento 7 y de color azul los demás tratamientos. Para la maquina SVM 2, el menor error *accuracy* ha sido con *kernel* tipo RBF. En la imagen, el área de color rojo corresponde a todas las muestras del tratamiento control, es decir, el número 14, en azul se presentan los demás tratamientos a excepción del 7, puesto a que este ya ha sido clasificado con la SVM 1.

Figura 52. Imágenes bidimensionales de las primeras cuatro máquinas de soporte vectoriales entrenadas.



Para el caso de la máquina SVM 3, se ha escogido el *kernel* tipo función polinomial con grado 2. En la imagen el área de color rojo corresponde al tratamiento de clase 8, y los otros tratamientos a excepción del 7 y 14 se muestran en el área de color azul. Finalmente, se destina la máquina SVM 4 para la separación del tratamiento 12 (en color rojo) y el resto de tratamientos en color azul.

En resumen, se realiza el entrenamiento de 13 máquinas de soporte vectoriales seriales, cuyas especificaciones en error y la clase que separa se muestra en la figura 53. Como se puede apreciar, las clases de menor error de predicción han sido las correspondientes a *Rhodnius prolixus* ojos rojos, *Triatoma dimidiata* ojos rojos y *Eratyrus*

macrunatus, razones por las cuales se han explicado anteriormente en la preparación de muestras y medidas de clases.

Figura 53. Detalles de las máquinas de soporte vectoriales entrenadas para clasificar los diferentes tratamientos.

SVM 1 Separar clase 7 E10,44%	SVM 2 Separar clase 14 E1,62%	SVM 3 Separar clase 8 E10,16%	SVM 4 Separar clase 12 E8,53%
SVM 5 Separar clase 11 E5,4%	SVM 6 Separar clase 13 E7,2%	SVM 7 Separar clase 10 E15,13%	SVM 8 Separar clase 9 E21,03%
SVM 9 Separar clase 04 E7,4%	SVM 10 Separar clase 06 E6,66%	SVM 11 Separar clase 03 E19,21%	SVM 12 Separar clase 05 E4,35%
SVM 13 Separar clase 02-01 E11,41%			

3.9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LA NE COMO DETECTOR DE TRIATOMINOS

A partir de los resultados adquiridos es posible afirmar que la nariz electrónica encuentra diferencias entre los volátiles emanados por insectos de la subfamilia Triatominae de los volátiles de confusión, ya sean de otros insectos o de elementos referencia.

Particularmente, en la respuesta de los sensores en presencia de la especie *Triatoma dimidiata* y *Triatoma dimidiata* ojos rojos no se encontraron diferencias significativas que permitan realizar una separabilidad exitosa, pues el error mínimo conseguido con las pruebas realizadas ha sido del 19.21 % (tratamiento 3 – TD ojos rojos) y 11.41 % (tratamiento 2 – TD sin mutación). Esto podría indicar que la alteración genética que se presenta en los individuos de *Triatoma dimidiata* ojos rojos no afecta considerablemente los compuestos volátiles, impidiendo la separabilidad entre estos dos tratamientos bajo las condiciones de laboratorio presentadas. El mismo caso se presentó para *Rhodnius Prolixus* y *Rhodnius Prolixus* ojos rojos.

Es posible atribuir las diferencias presentadas entre el tratamiento de *Rhodnius pallescens* infectado y no infectado a la presencia del parásito *Tripanosoma cruzi*, el cual puede llegar a desarrollar un cambio metabólico alterando así los compuestos de los infoquímicos emanados. De todos los factores del tratamiento de *Rhodnius pallescens* sin el parásito, no existió ningún experimento que entregara resultados tan significativos y de oxidación de los sensores de gas como los adquiridos por *Rhodnius*

pallescens infectado. Es por ello que se hace necesario realizar un estudio adicional de los compuestos que la nariz electrónica está detectando y diferenciando en los individuos, lo cual se puede realizar a través de técnicas de identificación de compuestos químicos de gases (como espectrometría de masas o cromatografía de gases acompañado de un *headspace*) con el fin de asegurarse que efectivamente existe un cambio en los volátiles emanados por los insectos en presencia o ausencia del parásito.

Existen características similares en los datos adquiridos a nivel de género, puesto a que el error para diferenciar los tratamientos de *Pastrongylus*, *Triatoma* y *Rhodnius* (a excepción de *Eratyrus*) han sido entre 4,35 % y 7,4 %, lo que concuerda con la clasificación taxonómica de las especies. Sin embargo, debido a la falta de densidad poblacional en el caso del género *Eratyrus* y en particular su especie *macrunatus*), para este caso no fue posible extraer información concluyente, puesto a que el error *accuracy* del clasificador para esta clase ha sido de 21.03 % con respecto a la clase control, es decir, que la nariz electrónica es incapaz de detectar la presencia de pocos individuos (baja densidad poblacional) en las condiciones presentadas en la experimentación.

Finalmente se observa que todos los sensores siguen una tendencia similar de aumento o degradación de la conductancia según sea el caso, y sus diferencias clasificatorias como características principales se encuentran en los niveles de sensibilidad y la relación entre la reacción química de los sensores, lo que constituye la particularidad de la huella olorífica.

4. CONCLUSIONES

El prototipo generalizado de la nariz electrónica como dispositivo de terminal móvil IoT presentó características benéficas para la aplicación particular en la detección de triatominos. Su uso resultó ser fácil de manipular y adaptable tanto en la fase de calibración como en la fase de pruebas. Además el procesamiento de datos en la nube no implicó problemas de implementación, lo que significa que el escalamiento de un proceso local a servidor fue meramente desarrollo de ingeniería sobre la plataforma.

Además, todos los sensores de gas comerciales y de fácil acceso, como los utilizados en este prototipo, son de uso industrial y general. Si se desea aumentar la precisión con la que se detecta algún tipo de volátil se haría necesario un estudio de caso y posteriormente el desarrollo del sensor según las necesidades requeridas. Bajo este enfoque, el prototipo de la nariz electrónica solo se vería afectado si el principio básico del nuevo sensor no es el mismo que los implementados, es decir, mediciones a partir del cambio de conductancia en el material de prueba, sin embargo, esto no constituye una problemática real, ya que el resto del dispositivo IoT puede ser configurable de acuerdo a la solución que se desarrolle.

Por otra parte, la implementación de algoritmos de reconocimiento de patrones con la configuración establecida en el prototipo ha permitido constatar que la incorporación de técnicas de extracción como de selección de características constituyen la fase más importante del procesamiento de datos, pues es allí en donde se concentra el poder de realizar una separabilidad exitosa. Es por ello que a pesar de que los parámetros aquí propuestos han sido suficientes para generar clasificación en los datos de los triatominos, el software ha quedado abierto para que desarrolladores de dispositivos análogos al realizado en este proyecto de investigación sean incorporados en el procesamiento y así constituir un desarrollo que posteriormente permite optimizar el proceso de clasificación. Ya ha iniciado con este progreso el primer bloque de inteligencia artificial básica en la plataforma del servicio IoT del grupo de investigación RadioGis.

Finalizado la fase de experimentos y procesado de datos, que permite evaluar la hipótesis de este trabajo de investigación orientado al funcionamiento de la nariz electrónica aplicado como apoyo en el área de entomología médica a partir de la detección de triatominos, se encuentra que existe la capacidad de diferenciar los volátiles emanados por especies vectores de la enfermedad de Chagas en comparación con otros insectos, los cuales fueron la especie *Aedes aegypti* (conocida por ser transmisores de enfermedades como dengue, chikungunya, zika y mayaro) y *Sitophilus oryzae* (conocido como el gorgojo de arroz, lo cual constituye a una de las plagas primarias de cultivos como trigo, arroz y maíz). Los alcances que han tenido los sensores de gas comerciales y de uso industrial han llegado al punto de encontrar separabilidad a nivel de género, además de identificar con un error *accuracy* del 5.4% los triatominos de la especie *Rhodnius pallescens* infectados de los no infectados. Se concluye verazmente que la nariz electrónica detecta en los triatominos una huella olorífica particular.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, C. M. D. (2013). Optimización de una nariz electrónica a través de un método de selección de variables. *Revista el hombre y la máquina*(41), 56–63.
- Adechy, M., Shiers, V., Rossel, J., y L. (1998). Study of rancidity and resistance to oxidation in edible oils and fats using electronic nose technology in comparison with conventional techniques. *Leatherhead Food RA Research Reports*(751).
- Álvarez-Molinero, M., y Aguilar-Naranjo, J. (2009, feb). Enfermedad de Emery-Dreifuss. *Rehabilitación*, 43(1), 37–39. Descargado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048712009703950> doi: 10.1016/S0048-7120(09)70395-0
- Angulo Silva, V. M. (2000). Aspectos ecológicos de la enfermedad de chagas en el oriente de Colombia. *Mvz- Cordoba*, 5(1), 64–68. Descargado de <http://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/revistamvz/article/view/545> doi: 10.21897/rmvz.545
- Arenas, E. (2016). *Diseño e implementación de un dispositivo de acoplamiento entre sensores de narices electrónicas y un terminal móvil de propósito especial* (Tesis de grado). Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia.
- Ashton, K. (2009). *That 'Internet of Things' Thing - In the real world, things matter more than ideas*. RFID Journal. Descargado 2016-06-24, de <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>
- Bliznakoff, D. (2014). *IoT : Tecnologías, usos, tendencias y desarrollo futuro*.
- Carcavall, R. U., Rabinovich, J. E., y Tenn, R. J. (1985). *Factores Biologicos Y Ecologicos En La Enfermedad De Chagas - Epidemiologia Vetores* (1.^a ed.). República Argentina: Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud - Organización Panamerica de la Salud (OMS), Tomo I - II. Descargado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/eco/018882-II/018882-II-01.pdf>
- Colciencias. (2016). *Convocatoria para proyectos de ciencia y tecnología e innovación en salud -2016*. Bogota, Anexo 2. Descargado de <http://colciencias.gov.co/convocatoria/convocatoria-para-proyectos-de-ciencia-tecnologia-e-innovacion-en-salud-2016>
- Conde, J., y Rangel, J. (2015). *Terminal móvil para transmisión de variables de sentido geo-referenciado usando redes de comunicación inalámbricas*. Tesis grado Ing. Electronica, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Crockford, D. (2002). *JSON (JavaScript Object Notation)*. Descargado de <https://www.json.org/>
- Durán, C., Velásquez, A., y Gualdrón, O. (2012). Implementación de una nariz electrónica para detectar pacientes con EPOC desde el aliento exhalado. *Ingeniería y desarrollo Universidad del Norte*, 30(2), 144–159.
- Durán Acevedo, C. M. (2005). *Diseño y optimización de los subsistemas de un sistema de olfato electrónico para aplicaciones agroalimentarias e industriales*. Departament D'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica, Universitat Rovira I Virgili.
- Durán Acevedo, C. M., Gualdrón Guerrero, O. E., y Hernández Ordoñez, M. (2014). Nariz electrónica para determinar el índice de madurez del tomate de árbol (*Cyphomandra Betacea* Sendt). *Ingeniería, Investigación y Tecnología*,

- 15(3), 351–362. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774314703464> doi: 10.1016/S1405-7743(14)70346-4
- Elliot, A., Cáceres, I., Guillén, Z., y Nakashima, I. (1988). Identificación de los chinches triatominos (Hemiptera, Reduviidae) conocidos del Perú. *Per Entomol*, 31, 18–20.
- Evans, D. (s.f.). *Internet of Things La próxima evolución de Internet lo está cambiando todo*. CISCO, Informe técnico, Estados Unidos. Descargado 2016-06-22, de <http://www.cisco.com/web/ES/assets/executives/pdf/Internet%20of%20Things%20IoT%20IBSG%200411FINAL.pdf>
- Figaro. (2005). *General information for TGS sensors*. Japan.
- Flores, G. B., y Lazzari, C. R. (1996, may). The role of the antennae in *Triatoma infestans*: Orientation towards thermal sources. *Journal of Insect Physiology*, 42(5), 433–440. Descargado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022191095001379> doi: 10.1016/0022-1910(95)00137-9
- Games, D. E., Schofield, C. J., y Staddon, B. W. (1974, sep). The Secretion from Brindley’s Scent Glands in Triatominae. *Annals of the Entomological Society of America*, 67(5), 820–820. Descargado de <https://academic.oup.com/aesa/article-lookup/doi/10.1093/aesa/67.5.820> doi: 10.1093/aesa/67.5.820
- Hemiptera, R. (2011). Morfometría geométrica y filogenia en *Rhodniini* (Hemiptera, Reduviidae) de Venezuela. *Acta zoológica mexicana*, 27(1), 87–102.
- Hunkeler, U., Truong, H. L., y Stanford-Clark, A. (2008, jan). MQTT-S — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. En *2008 3rd international conference on communication systems software and middleware and workshops (comsware ’08)* (pp. 791–798). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/document/4554519/> doi: 10.1109/COMSWA.2008.4554519
- IERC. (2009). *European Research Clustes on the Internet of Things*. European Research Clustes on the Internet of Things. Descargado de <http://www.internet-of-thingsresearch.eu/pdf/IoT%20Cluster%20Strategic%20Research%20Agenda%202011.pdf>
- Intel Software, D. Z. (2014). *Documentación de la placa Intel Galileo*. Descargado de <https://software.intel.com/es-es/iot/hardware/galileo/documentation>
- Iveth Moreno Rony Caballero, R. G. F. M. A. J. (2009). La nariz electrónico: Estado del arte. *Revista Iberoamericana de Automática e informática industrial*.
- Jesus Brezmes, X. C. (2002). *Diseño de una nariz electrónica para la determinación no destructiva del grado de maduración de la fruta* (U. P. de Catalunya, Ed.). Departament de teoria del senyal i comunicacions.
- Musk, E., y Altman, S. (2016). *OpenAI Gym*. Descargado de <https://gym.openai.com/docs/>
- Olivares, J. (2016, mar). *Reconocen dificultades para el diagnóstico temprano del mal de “Chagas”*. Descargado 2016-05-18, de <https://www.launion.com.mx/morelos/cuatla/noticias/87071-reconocen-dificultades-para-el-diagnostico-temprano-del-mal-de-chagas.html>
- Palmezano, J., Plazas, L., Rivera, K., y Rueda, V. (2015). Chagas disease: reality of a frequent pathology in Santander, Colombia. *Medicas UIS*, 28, 81–90.

- Paulsson, N., Larson, E., y Winquist, F. (2000). *Extraction and selection of parameters for evaluation of breath alcohol measurement with an electronic nose* (1.ª ed.). *Sensors Actuators A* 84, pp. 187-197.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in {P}ython. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830. Descargado de <http://scikit-learn.org/stable/about.html#people>
- Pérez, A. A., Pérez Molina, J. A., Navarro, B. M., y López-Vélez, R. (2009). Enfermedad de Chagas en personas procedentes de latinoamérica residentes en España. *Ministerio de Sanidad y Política Social*, 84.
- Pérez Hernández, R. (2015). *Desarrollo de prototipo de sensor IoT de la red SigFox* (Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación). Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación, Dep de Ing. Telemática, Universidad de Sevilla, España,.
- Rasmus, L. (1995). *PHP (Personal Home Page)*. Descargado 2017-11-21, de <http://php.net/>
- Rojas Blanco, L. D. (2010). *Diseño y desarrollo de un equipo multisensorial basado en sensores de gases químicos para la validación de diferentes métodos de selección de variables*. Pamplona, Colombia: Biblioteca de la Universidad de Pamplona.
- Rossiter, M., y Staddon, B. W. (1983, apr). 3-Methyl-2-hexanone from the triatomine bug *Dipetalogaster maximus* (Uhler) (Heteroptera; Reduviidae). *Experientia*, 39(4), 380–381. Descargado de <http://link.springer.com/10.1007/BF01963134> doi: 10.1007/BF01963134
- Ruiz Jiménez, L. F., Rodríguez Velásquez, Y. A., y López Higuera, P. A. (2015). *Caracterización de un módulo de reconocimiento de patrones para un servicio TIC basado en narices electrónicas* (Tesis de grado). Ing. Electronica, Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia.
- Russell, S., Dewey, D., y Tegmark, M. (2016). Research Priorities for Robust and Beneficial Artificial Intelligence. *Association for the Advancement of Artificial Intelligence*, 105–114. Descargado de <http://arxiv.org/abs/1602.03506> doi: 10.1609/aimag.v36i4.2577
- Schofield, G. J., y Patterson, J. W. (1977, jun). Assembly Pheromone of *Triatoma infestans* and *Rhodnius prolixus* Nymphs (Hemiptera: Reduviidae). *Journal of Medical Entomology*, 13(6), 727–734. Descargado de <https://academic.oup.com/jme/article-lookup/doi/10.1093/jmedent/13.6.727> doi: 10.1093/jmedent/13.6.727
- sensing Sensovant, S. (2014). *Sensores de Gases Contaminantes*. Descargado 2017-10-18, de <http://sensovant.com/productos/gases/gases-contaminantes/equipos-medir-calidad-aire.html>
- Soto-vivas, A. (2009). Clave pictórica de triatóminos (Hemiptera : Triatominae) de Venezuela. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, XLIX(2), 259–274.
- Trillos Leon, N. E., y Moreno Lozada, J. A. (2017). *Diseño y construcción de un sistema de control inalámbrico para el desplazamiento y movilidad de un robot de telepresencia con tecnología omnidireccional*.
- Vilasanjuan, R. (2015, apr). *Chagas en Colombia: Una oportunidad pa-*

ra liderar el cambio. Bogotá. Descargado 2016-06-28, de <http://www.dndial.org/es/comunicacion-e-informacion/noticias-interes/671-viewpointchagasnacolumbia.html>

Zacharias, C. A. (2011). *Comunicación sexual en triatomíneos (Heteroptera : Reduviidae): claves químicas asociadas al vuelo y al apareamiento* (Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires). Descargado de http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis{}_4916{}_Zacharias.pdf

ANEXOS

ANEXO A. Glosario básico de la terminología utilizada en el libro.

Se presenta a continuación un breve catálogo alfabético de las palabras y expresiones más utilizadas durante la presente propuesta debido a características polisémicas presentadas entre el área de biología, química e ingeniería, con esto es posible establecer la misma terminología.

CAMPAÑAS DE PREVENCIÓN Y CONTROL

Son planes estratégicos que establecen medidas y acciones sanitarias para el control o erradicación de una enfermedad en específico. Estas en general tienen el objetivo de sensibilizar una población para generar cultura de prevención de enfermedades promoviendo hábitos de vida saludables y reconocimiento de factores de riesgo que permitan reducir de forma significativa la incidencia de las enfermedades.

CATEGORÍA TAXONÓMICA

Corresponde a los distintos niveles de jerarquías en un sistema de clasificación, en biología hace referencia a la organización clasificatoria de especies.

CLAVE TAXONÓMICA

Acción de un especialista de clasificar adecuadamente en una categoría taxonómica algún individuo.

ENDÉMICO(A)

Enfermedad que reina habitualmente, o en épocas fijas, en un país o comarca. Propio y exclusivo de determinadas localidades o regiones.

ESPECIE

El concepto de especie biológica se define como el conjunto de poblaciones formadas por individuos que tienen el potencial para cruzarse entre ellos y producir descendencia fértil, y que se encuentran aislados de otros grupos próximos; esta definición también es conocida como especie sexual.

IOT

El término IoT corresponde a las siglas en inglés de Internet of Things y hace referencia a la interconexión digital de objetos cotidianos con el fin de intercambiar datos y llevar información a usuarios de manera segura.

RASGOS MORFOLÓGICOS

La morfología es la disciplina encargada del estudio de la estructura de un organismo o sistema y sus respectivas características. Esto incluye aspectos de la apariencia externa (forma, color estructura) así como aspectos de la estructura interna del organismo como huesos y órganos. En contraste con la fisiología que estudia principalmente la función de estas estructuras.

TAXONOMÍA

Deriva del griego, taxis: significa orden y nomos: ley u norma. Es la parte de la ciencia que se ocupa de la ordenación y clasificación, además de las bases, principios y leyes que regulan dicha clasificación. Se dice que una determinada categoría taxonómica es natural cuando todos los grupos taxonómicos que la forman están relacionados filogenéticamente. Lo cual no siempre concuerda con los sistemas de clasificación.

TIC

Las Tecnologías de la Información y la Comunicación, también conocidas como TIC, son el conjunto de tecnologías desarrolladas para gestionar información y enviarla de un lugar a otro. Abarcan un abanico de soluciones muy amplio. Incluyen las tecnologías para almacenar información y recuperarla después, enviar y recibir información de un sitio a otro, o procesar información para poder calcular resultados y elaborar informes.

TRANSMISIÓN TRANSFUSIONAL

Transmisión de alguna enfermedad debido a transfusiones sanguíneas realizadas entre dos individuos, uno infectado y uno sano.

VECTOR

En términos biológicos, un vector es cualquier agente (persona, animal o microorganismo) que transporta y transmite un patógeno a otro organismo vivo. Los vectores biológicos se estudian por ser causas de enfermedades, pero también como posibles curas. Se le llama vector a un mecanismo, generalmente un organismo, que transmite un agente infeccioso o infectante desde los individuos afectados a otros que aún no portan ese agente.

ZOONOSIS

Aquellas enfermedades que se transmiten de forma natural de los animales vertebrados al hombre, y viceversa. Existen otras enfermedades infecciosas (bacterianas y víricas) que, aunque ordinariamente no se transmiten del hombre a los animales, pueden afectar a ambos, para las cuales también se utiliza el término zoonosis. Se trata de agentes que viven de forma saprofitica en ciertos medios y son fuente de infección tanto para el hombre como para los animales, como por ejemplo la listeriosis.