

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

### DEVELOPMENT OF AN EMBASSYED MULTI-SENSOR SYSTEM FOR THE DETECTION OF INCIPIENT FAILURES IN ELECTRIC TRANSFORMERS

 Ing. Emili Catherine Trujillo Barajas\*,  PhD. Oscar Eduardo Gualdrón  
Guerrero\*,  MSc. Diego Alfonso Peláez Carrillo\*

\* **Universidad de Pamplona**, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Ingeniería Electrónica.  
Grupo de investigación Sistemas multisensoriales y reconocimiento de patrones (GISM).  
Kml vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: (57+7) 5685303 - 5685304  
E-mail: {emili.trujillo, oscar.gualdron, diego.pelaez}@unipamplona.edu.co

**Cómo citar:** Trujillo Barajas, E. C., Gualdrón Guerrero, O. E., & Peláez Carrillo, D. A. (2023). DESARROLLO DE UN SISTEMA MULTISENSORIAL EMBEBIDO PARA DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES EN TRANSFORMADORES ELECTRICOS. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA), 1(41), 50-57. Recuperado a partir de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/2417>

Derechos de autor 2023 Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA).  
Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).



**Resumen:** El trabajo de investigación se basó en la elaboración de un sistema embebido capaz de detectar gases volátiles incipientes presentes en los transformadores eléctricos. Para realizar la detección de cada uno de los gases que allí se localizan, se aplicó ingeniería de detalle para la toma y adquisición de datos provenientes del sistema multisensorial, esto por medio de cada una de las pruebas que se debe aplicar a los sensores que se utilizaron para la toma de muestras, luego de haber realizado este tipo de ingeniería, se realizó un algoritmo para clasificar los datos adquiridos por medio del sistema multisensorial anteriormente planteado y esto con el fin de saber qué tipo de gas se detectó para la respectiva clasificación de los mismos, una vez logrado cada uno de los pasos anteriormente formulados se implementó un sistema inalámbrico capaz de dar la información interna que se está presentado en tiempo real en el transformador con el fin de hacer un monitoreo constante para prevenir los daños futuros, y con esto implementar sistemas de mantenimiento bien sean preventivos o predictivos y así evitarle costos a la empresa encargada de dar manteniendo y buen funcionamiento a estos elementos de distribución eléctrica.

**Palabras clave:** Nariz Electrónica, Red Neuronal, Análisis PCA.

**Abstract:** The project is based on the development of an embedded system capable of detecting incipient volatile gases in electrical transformers, in order to detect each of the gases that are located there, detailed engineering must be applied for the acquisition and acquisition of data from the multisensory system, this by means of each of the tests that must be applied to the sensors that were used for the sampling, after having done this type of engineering, an algorithm must be performed to classify the acquired data by means of the multisensory system previously proposed and this in order to know what type of gas

was detected for the respective classification of them, once each of the previously formulated steps has been achieved, a wireless system capable of providing the information is going to be implemented internal that is presented in real time in the transformer in order to make a constant monitoring for prevent future damages, and with this, implement maintenance systems, whether preventive or predictive, and thus avoid costs to the company responsible for maintaining and maintaining these elements of electrical distribution.

**Keywords:** Electronic Nose, Neural Network, PCA analysis.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las narices electrónicas ha sido uno de los principales dispositivos que se han venido utilizando en los últimos tiempos en procesos industriales y desarrollos médicos, (Luz & Méndez, n.d.) es por ello que en el presente trabajo se elaboró una investigación sobre el método de análisis que se le debe hacer al aceite de los transformadores eléctricos utilizando las narices electrónicas que permitan detectar el tipo de fallas que se presentan en estos.

Actualmente para analizar dichos aceites se hace por medio de técnicas especializadas como es la cromatografía de gases. El cual es un método para separar componentes de una mezcla de compuestos volátiles. En la mayoría de los casos, la separación es llevada a cabo para identificar y cuantificar cada uno de los componentes de la muestra (Jaimes\_2019\_TG, n.d.). Debido a lo mencionado anteriormente, se planteó como novedad del trabajo el buscar estrategias alternativas que permitan en cierta forma remplazar o al menos tener una metodología paralela al análisis por medio de cromatografía de gases, particularmente en los procesos de análisis de los gases insipientes presentes en los aceites de los transformadores eléctricos. Y así de esta manera con la implementación del sistema multisensorial denominado nariz electrónica se pueda ser capaz de hacer un monitoreo en tiempo real estando el transformador en funcionamiento y evitar fallas futuras alargando la vida útil del mismo.

“El análisis de aceite de transformador es una probada técnica de prevención que debería formar parte de cualquier programa de mantenimiento predictivo de las condiciones. Gracias a un sistema de alerta temprana, el análisis de aceite de transformador permite a las empresas identificar las prioridades en el mantenimiento, planificar los programas de asignación de trabajo, y hacer pedido de aquellas partes y materiales necesarios”.(de

Ingenierías, n.d.). Teniendo en cuenta que “La vida útil de un aceite aislante no se puede medir en tiempo propiamente pues su degradación depende de las condiciones de operación, del régimen de carga del transformador, de su diseño, de la composición del aceite aislante, de su contenido de inhibidos natural y/o sintético” (García Vélez, 2010).

En cuanto al estado del arte de las narices electrónicas utilizadas en la industria para la detección de gases se puede decir que estos dispositivos han sido uno de los que más expectativas ha despertado en el contexto mundial con respecto a la detección y comportamiento de los volátiles en diferentes aplicaciones, (Correa & Barreiro, n.d.). Por ejemplo, la implementación y evaluación de una nariz electrónica para la detección de alcoholes lineales (Paredes-doig et al., 2016), entre otros.

Otro mecanismo utilizado como sistema multisensorial es la lengua electrónica (LE) el cual es un emulador de la lengua humana, su principal objetivo es trabajar bajo la misma filosofía de los paneles de captación. Estos dispositivos generan datos de la composición global de la matriz a través del sensado. Una de las ventajas de este equipo es que no requiere personal cualificado, es de bajo costo a comparación de los equipos estándar portabilidad y obtención de resultados de una forma más rápida (Manuel Durán Acevedo & Lisset Jaimes Mogollón Oscar Eduardo Gualdron Guerrero, n.d.).

## 2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se describen cada uno de los métodos utilizados para el desarrollo del trabajo.

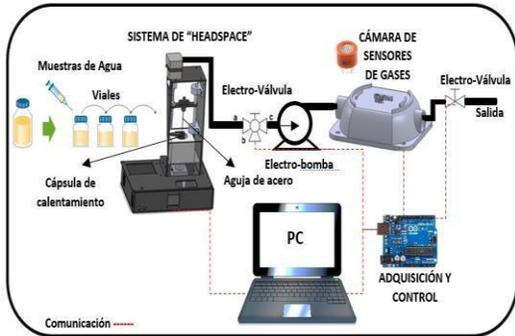


Fig. 1. Esquema general de la metodología implementada. (Carrillo et al., n.d.)

Lo que se busca abordar con la elaboración de esta investigación es reemplazar el alto costo que puede generar el análisis de los gases por medio de la cromatografía de gases a través del uso de una nariz electrónica y poder aplicar el muestreo de cabeza como el proceso para la extracción y respectivo análisis de los gases allí presentes, la nariz electrónica es un dispositivo capaz de detectar por medio de su cámara de gases la concentración y discriminación de los mismos, por medio del PCA (análisis de componentes principales) y el respectivo entrenamiento de una red neuronal.

## 2.1 Headspace Sampling

(Muestreo de cabeza) diseñado y elaborado por jóvenes investigadores de la Universidad de Pamplona – Colombia.

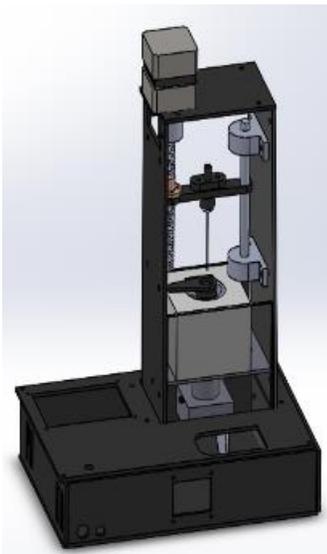


Fig. 2. Diseño del Headspace Sampling (imagen propia)



Fig. 3. Headspace Sampling (imagen propia)

El diseño de esta etapa se realizó con el fin de dar una similitud en cuanto a la función que realiza el cromatógrafo de gases, el proceso que se hace en el muestreo de cabeza es calentar por medio de una resistencia eléctrica la muestra que se va analizar, luego por medio de una válvula de extracción enviar los gases a una nariz electrónica que contiene una cámara de sensores en los cuales se hace concentración de los mismos en un tiempo determinado los cuales respondían según su caracteriza o función de trabajo.

## 2.2 Procedimiento

Para la extracción del aceite de los transformadores se deben tener en cuenta ciertas condiciones, la forma de extracción se debe realizar por medio de una jeringa de vidrio, este material evita contaminación y alteración del compuesto, este proceso se realizó por medio de la empresa CENS (Centrales Eléctricas de Norte de Santander - Colombia) empresa acompañante del proyecto.



Fig. 4. Extracción de aceite (No Title, 2012).

Luego de obtener las muestras de aceite que se solicitó a la empresa CENS (empresa que realizó el

respectivo proceso de extracción del aceite por medio de uno del personal de mantenimiento), la cual se le realiza a un transformador de potencia que se encuentra ubicado en la planta principal de la empresa en la ciudad de Cúcuta, es una muestra de un transformador que se encontraba en funcionamiento en el momento de su extracción, esto con el fin de poder tomar el estado del aceite ya con un previo calentamiento y los volátiles se encuentren en su mayor cantidad disponible.

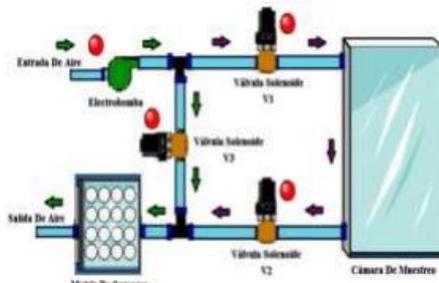


Fig. 5. Nariz Electrónica E-Nose  
Universidad de Pamplona

### 2.3 Nariz Electrónica

Un concepto muy general de la nariz electrónica es la de un instrumento que consiste en un conjunto de sensores electroquímicos con una especificidad parcial y un sistema adecuado de reconocimiento de patrones, capaz de reconocer olores simples o complejos. En la Figura 6 se aprecia el sistema de nariz electrónica disponible para el desarrollo de este proyecto, la cual consta de las siguientes partes (Gualdrón et al., 2014):

- Bomba de aire y válvulas de paso eléctricas.
- Circuito de control de potencia.
- Cámara de concentración de volátiles.
- Cámara con sensores de gas.
- DAQ de 16 Canales



Figura 6 Nariz Electrónica (Universidad de Pamplona)(Gualdrón et al., 2014).

### 2.4 Arduino Mega

Para realizar la programación del headspace sampling se utilizó un Arduino Mega.

Posee 54 pines digitales que funcionan como entrada/salida; 16 entradas análogas, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un botón de reset y una entrada para la alimentación de la placa.

La comunicación entre la computadora y Arduino se produce a través del Puerto Serie. Posee un convertidor USB-SERIE, por lo que sólo se necesita conectar el dispositivo a la computadora utilizando un cable USB como el que utilizan las impresoras.

### 2.5 Adquisición de la data y procesamiento

La adquisición de los datos dentro de la nariz electrónica se hizo por medio de una tarjeta DAQ (National Instruments), y el procesamiento de estos se realizaron por medio del software Matlab® 2014b, donde se pudo visualizar la respuesta de cada uno de los sensores cuando se exponía la muestra a diferentes cambios de temperaturas y diferente tipo de muestra, a continuación, en la Figura 7 y 8 se podrá observar la respuesta de los sensores a 30°C y 40°C de la muestra del aceite.

En la figura 7, se aplica a la muestra localizada en el vial una temperatura de 30°C para observar cómo es la reacción de los sensores ante el aumento de la temperatura y así poder captar cada uno de los datos que estos nos entregan para su respectivo análisis

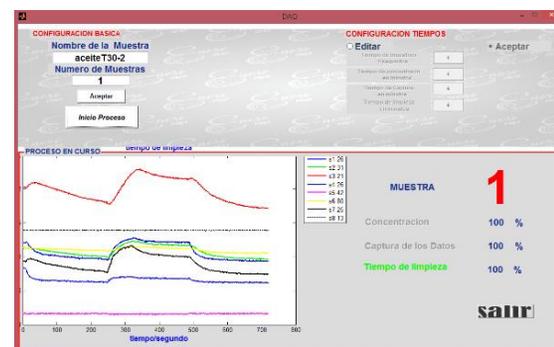


Fig. 7. Respuesta de los sensores a 30°C

En la figura 8, se aplica a la muestra localizada en el vial una temperatura de 40°C donde se puede observar la variación de la respuesta en cada una de las líneas con respecto a su amplitud en comparación a la imagen anteriormente mostrada, cabe complementar que cada una de las muestras se

debe tomar en el mismo tiempo para así obtener el mismo tamaño de los datos y poder aplicar el respectivo análisis PCA en cuanto a la respuesta obtenida.

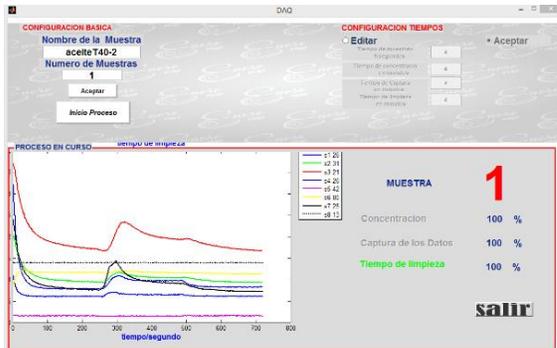


Fig. 8. Respuesta de los sensores a 40°C

Dado cada uno de estos resultados obtenidos por medio del software empleado para el debido procesamiento de las muestras se procede a realizar el análisis PCA con respecto a todas las muestras y resultados obtenidos de las mismas.

## 2.6 PCA

Estas técnicas fueron inicialmente desarrolladas por Pearson a finales del siglo XIX y posteriormente fueron estudiadas por Hotelling en los años 30 del siglo XX. Sin embargo, hasta la aparición de los ordenadores no se empezaron a popularizar. Para estudiar las relaciones que se presentan entre  $p$  variables correlacionadas (que miden información común) se puede transformar el conjunto original de variables en otro 5 conjunto de nuevas variables incorreladas entre sí (que no tenga repetición o redundancia en la información) llamado conjunto de componentes principales. (Tema 3: *Análisis de Componentes Principales*, n.d.)

PCA (análisis de componente principales) En estadística, es una técnica utilizada para describir un set de datos en términos de nuevas variables ("componentes") no correlacionadas. Los componentes se ordenan por la cantidad de varianza original que describen, por lo que la técnica es útil para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Técnicamente, el PCA busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados. Esta convierte un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto de valores de variables sin correlación lineal llamadas componentes principales. El PCA se emplea sobre

todo en análisis exploratorio de datos y para construir modelos predictivos. El PCA comporta el cálculo de la descomposición en auto valores de la matriz de covarianza, normalmente tras centrar los datos en la media de cada atributo.

Una vez se aplicó el análisis PCA a todas las muestras tomadas y a diferentes temperaturas por medio del calentamiento previo que se hace con el headspace sampling, se reúnen en un solo archivo cada uno de los resultados y se hace el respectivo análisis, a continuación, en la figura 9 se mostrará el proceso que se hace para seleccionar el tipo de análisis que quiero efectuar a las muestras y luego obtener el análisis PCA, para dos muestras.

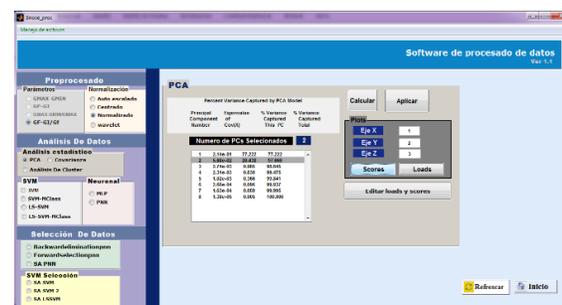


Fig. 9. Análisis PCA (imagen propia)

Cuando se ha seleccionado el pre procesado de la data y calculamos según la respuesta de los sensores en cuando a cada una de las muestras, en la figura 10 se podrá observar la debida clasificación, teniendo en cuenta que las muestras tomadas fueron de dos transformadores en diferentes estados, la primera se tomó de un transformador en funcionamiento (muestras encerradas en el color amarillo) y la otra es de un aceite totalmente nuevo (muestras encerradas en el color rojo).

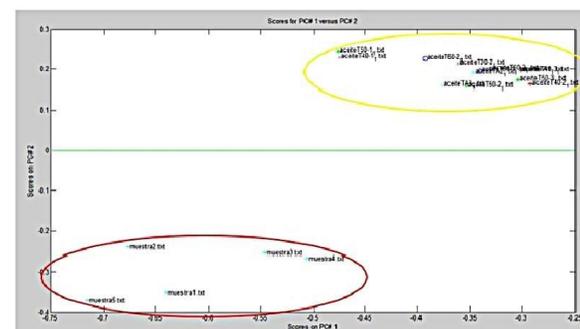


Fig. 10. Separación de cada una de las muestras

Con este resultado se puede determinar que el sistema funcionó al 100%, porque al observar el estado en el que se encuentran cada grupo de

muestras, la separación es totalmente visible, por tanto una vez se tenga la clasificación por medio del software se debe entrenar una red neuronal y realizarle el debido entrenamiento para que por medio de esta se detecte que tipo de falla se está presentando y así la empresa pueda ejecutar un mantenimiento preventivo al equipo y garantizar una mayor vida útil al transformador.

En la Tabla 1 se mostrará los tipos de fallos y los gases que están asociados a cada tipo de falla presente.

*Tabla 1: Fallas de los Transformadores*

FALLA	GAS CLAVE	RESULTADOS
Arco	Acetileno	Se produce en grandes cantidades de acetileno e hidrogeno o pequeñas cantidades de metano y etileno.
Corona	Hidrogeno	Descargas de baja energía producen hidrogeno y metano, así como pequeñas cantidades de etano y etileno.
Sobrecalentamiento del aceite	Etileno y metano	El sobrecalentamiento a 150°C producirá etileno y metano o hidrogeno y metano a 600°C. Se pueden generar trazas de acetileno si la falla es severa o se producen contactos eléctricos.
Sobrecalentamiento de la celulosa	Monóxido de carbono	Si la celulosa se sobrecalienta se produce monóxido de carbono.

## 2.7 Falla de arco

Para la falla de arco se debe tener en cuenta que es una falla provocada por sobretensiones causadas por descargas parciales, fallas externas o maniobras de Switchero en el sistema, por el movimiento de los devanados bajo la acción de fuerzas electromagnéticas durante un corto circuito externo. Ésta puede presentarse entre los devanados y el núcleo, así como en el tanque y entre espiras. (de Fallas et al., n.d.)

## 2.8 Fallas de corona

Es una falla interna, esta falla se produce internamente en los devanados del transformador. Esto sucede cuando el aislamiento dieléctrico ya sea líquido o gaseoso, pierde sus propiedades, ocurriendo la ionización de éstos. Se manifiesta de una forma luminosa alrededor de los devanados, de ahí su nombre de efecto corona. (de Fallas et al., n.d.)

## 2.9 Sobrecalentamiento del aceite

En este tipo de falla se pueden distinguir dos etapas, la de alta y la de baja temperatura, dependiendo de la cantidad relativa de energía que se esté disipando. En baja temperatura se pueden romper enlaces interiores carbono-carbono en la molécula del aceite formando Metano y Etano. (Gutiérrez Chávez & Montes de Oca-Ramírez, 2021)

## 2.10 Sobrecalentamiento de la celulosa

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

## 3. IMPLEMENTACION ALGORITMO NEURONAL

El cerebro humano es el sistema de cálculo más complejo que conoce el hombre. El ordenador y el hombre realizan bien diferentes clases de tareas; así la operación de reconocer el rostro de una persona resulta una tarea relativamente sencilla para el hombre y difícil para el ordenador, mientras que la contabilidad de una empresa es tarea costosa para un experto contable y una sencilla rutina para un ordenador básico, con esta definición nos hacemos a la idea de la capacidad tan grande de procesamiento de información del ser humano, donde los estudios innovadores de los años presentes sean basado en la composición humana para crear nuevas tecnologías. (Olabe, n.d.)

Las redes neuronales son más que otra forma de emular ciertas características propias de los humanos, como la capacidad de memorizar y de asociar hechos. Si se examinan con atención aquellos problemas que no pueden expresarse a través de un algoritmo, se observará que todos ellos tienen una característica en común: la experiencia. El hombre es capaz de resolver estas situaciones acudiendo a la experiencia acumulada. Así, parece claro que una forma de aproximarse al problema consista en la construcción de sistemas que sean capaces de reproducir esta característica humana.



experiencia como investigador de la Universidad de Pamplona.

## REFERENCIAS

- alberto ruiz marta susana basualdo autor, c., & jorge matich, d. (n.d.). *cátedra: informática aplicada a la ingeniería de procesos-orientación i redes neuronales: conceptos básicos y aplicaciones*.
- bacterias en agua potable a través de una nariz electrónica y un equipo de extracción de volátiles jeniffer katerine carrillo gómez, d. de, manuel duran acevedo, c., & ovidio garcia rico, r. (n.d.). *bacterial discrimination of drinking water through of an electronic nose and a volatiles extraction equipment*.
- Correa, E. C., & Barreiro, P. (n.d.). *El Ámbito De La Industria*.
- de Fallas, P., Los, E. N., De, T., Mediante, P., Técnica, L. A., Cromatografía, D. E., & Gases, D. E. (n.d.). *INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA*.
- de Ingenierías, F. (n.d.). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL*.
- García Vélez, E. O. (2010). *Diagnóstico y mantenimiento de transformadores de gran potencia en aceite*. 128.
- Gualdron, O., Duran, C., Ortiz, J., & Araque, J. (2014). Implementation of a neural model in a hardware device(FPGA) for the classification of chemical compounds in a multisensory (E-nose). *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(24), 127–133.
- Gutiérrez Chávez, B. A., & Montes de Oca-Ramírez, G. (2021). Determinación de fallas en transformadores de potencia inmersos en aceite mineral aislante basándose exclusivamente en el DGA y mediante la evaluación del NEI. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 4(3), 208–223. <https://doi.org/10.37636/recit.v43208223>
- Jaimes\_2019\_TG. (n.d.).
- Luz, M., & Méndez, R. (n.d.). *FACULTAD DE CIENCIAS DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA MINERALOGÍA Y CRISTALOGRAFÍA Presentada por Natalia Prieto Castañeda para optar al grado de doctora por la Universidad de Valladolid*.
- Manuel Durán Acevedo, C., & Lisset Jaimes Mogollón Oscar Eduardo Gualdron Guerrero, A. (n.d.). *APLICACIÓN DE UNA LENGUA ELECTRÓNICA PARA LA CLASIFICACIÓN DE VINOS APPLICATION OF ELECTRONIC TONGUE FOR CLASSIFICATION OF WINES*. [www.Dropsens.com](http://www.Dropsens.com)
- No Title. (2012).
- Olabe, X. B. (n.d.). *REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y SUS APLICACIONES*.
- Paredes-doig, A. L., Sun, R., Picasso-escobar, G., Doig-camino, E., & Comina, G. (2016). Implementación y evaluación de una nariz electrónica para la detección de alcoholes lineales. *Revista Colombiana de Química*, 45(2), 12–18.
- Posgrado, E. de, Capra, de, Custodio, C., Angel Asesor, M., Villalobos, V., & Javier, V. (n.d.). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO Predicción por Redes Neuronales Artificiales del comportamiento productivo I D A D N A C I O N A L D E*.
- Redes Neuronales Artificiales Fernando Tanco I. Introducción*. (n.d.).
- Rodríguez, J., José, D., Contreras De León, E., & Zambrano, E. (n.d.). *¿CONOCES LOS ANÁLISIS DE GASES PARA LA PREVENCIÓN OPORTUNA DE FALLAS EN LOS TRANSFORMADORES?*
- Tema 3: Análisis de Componentes Principales*. (n.d.).