

SISTEMA DE OLFATO ELECTRÓNICO PARA CARACTERIZACIÓN DEL AROMA
DEL CAFÉ



JOHAN ALBERTO MIRANDA MENESES

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERIA EN AUTOMATICA INDUSTRIAL
POPAYÁN, CAUCA
2020

JOHAN ALBERTO MIRANDA MENESES

SISTEMA DE OLFATO ELECTRÓNICO PARA CARACTERIZACIÓN DEL AROMA
DEL CAFÉ

Monografía presentada a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del título de:

Ingeniero en Automática Industrial.

DIRECTOR:

DIEGO ANDRÉS CAMPO CEBALLOS M.Sc.
Estudiante Doctorado en Ciencias de la Electrónica.

CO-DIRECTOR:

CARLOS ALBERTO GAVIRIA LÓPEZ Ph.D.
Profesor Titular FIET

POPAYÁN, CAUCA
2020

Nota de aceptación: _____

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Resumen

El interés de aplicar la ingeniería en el proceso de cata de uno de los productos más comercializados a nivel mundial, el café, gran parte de su proceso de producción se ha tecnificado y existen estándares de calidad asociados a cada etapa de procesamiento, el objetivo del presente trabajo de grado fue evaluar si un sistema de olfato electrónico propuesto, podría aportar al proceso mencionado, la cata, específicamente la caracterización de las propiedades de fragancia y Aroma. Siendo que sistemas de nariz electrónica han demostrado ser útiles a nivel industrial en aplicaciones de control de calidad, seguridad y monitoreo, el objetivo del proyecto fue construir un sistema de olfato electrónico que permita adquirir, mediante la detección de VOC(Compuestos Orgánicos Volátiles), datos con los cuales efectuar un análisis de características de señales del sistema, buscando correlacionar las señales adquiridas de los sensores con las características organolépticas ya mencionadas de muestras de café, para ello se desarrolló un prototipo de nariz dotado de una matriz de sensores de gas, y se llevó a cabo un proceso de identificación y estimación de las dinámicas del sistema, entre las variables del sistema se encuentran el flujo de gas, la temperatura y humedad de la cámara de detección.

Para la detección de compuestos orgánicos volátiles se empleó técnica de detección de umbral por cambio en la conductancia del arreglo de sensores de gas, esta matriz se implementó con sensores detectores de gas de la familia MQ, específicamente los sensores: MQ4, MQ6, MQ8 y MQ135. Se implementó un controlador digital de flujo para mantenerlo constante en los ciclos de muestreo, de tal manera que la influencia del flujo fuera conocida y apartada de las interacciones entre la muestra y la matriz de sensores, los datos adquiridos fueron tratados por medio del método de componentes principales. Se evaluó el desempeño del sistema a través de un procedimiento que incluyó muestras de café en específicos grados de tostion tomando en cuenta los protocolos SCAA (Asociación Americana para cafés especiales), con lo cual se generaron datos de la respuesta de la matriz en conjunto frente a cada aroma, así se concluyó que el sistema permite detectar cambios en el volumen de muestra de café, además que los valores obtenidos son adecuados para un tratamiento de identificación de patrones.

Palabras clave: Olfato electrónico, procesamiento de señales, café, identificación, análisis de patrones.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1.1 El café | 7 |
| 1.2 Sistemas de olfato electrónico | 8 |
| 1.2.1 Detección..... | 9 |
| 1.2.2 Acondicionamiento de señal y pre-procesado..... | 13 |
| 1.2.3 Análisis de Patrones | 13 |
| 1.2.4 Aplicaciones de sistemas de nariz electrónica: | 15 |
| 1.2.5 Aplicaciones de Sistemas de Nariz Electrónica al proceso del Café | 16 |
| 1.2.6. Objetivos | 17 |
| 2. DESARROLLO DE SISTEMA DE OLFATO ELECTRÓNICO | 19 |
| 2.1. Introducción | 19 |
| 2.2 Metodología..... | 20 |
| 2.2.1 Selección de Muestra | 20 |
| 2.2.2 Levantamiento de requerimientos y Selección de variables. | 21 |
| 2.3 Partes del sistema propuesto | 24 |
| 2.4 Concentración y detección: | 26 |
| 2.5 Circuito Eléctrico. | 40 |
| 2.6 Matriz de Sensores. | 41 |
| 3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES | 46 |
| 3.1. Correlaciones VOC con fragancia y aroma del café | 46 |
| 3.2. Tratamiento de datos | 50 |
| 3.3 Respuesta de la matriz de sensores. | 51 |
| 4. CONCLUSIONES | 60 |
| 5. BIBLIOGRAFIA | 62 |

LISTA DE ILUSTRACIONES.

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Puntuación protocolo SCAA para cata de café | 8 |
| Ilustración 2. Comparativa sistema olfatorio, nariz electrónica y nariz bioelectronica [15]..... | 12 |
| Ilustración 3. Filtro pasa bajo (a y b) pasivo (c) activo[15] | 13 |
| Ilustración 4. Técnicas de Análisis Multivariado [16] | 14 |
| Ilustración 5 El Olor y Composición química del café | 18 |
| Ilustración 6. Proceso de tostado [29] | 20 |
| Ilustración 7 Trazabilidad muestra de café [29]..... | 21 |
| Ilustración 8. componentes aroma de café [25]..... | 22 |
| Ilustración 9. Rueda de Cata café..... | 22 |
| Ilustración 10. Sistema Olfativo [15] | 25 |
| Ilustración 11 Proceso sistema olfatorio [5]..... | 25 |
| Ilustración 12. Procesos sistema de olfato electrónico[5] | 26 |
| Ilustración 13. Cámaras de concentración y detección. | 27 |
| Ilustración 14 representación de instrumentación [26] | 28 |
| Ilustración 15- Diagrama P&ID | 30 |
| Ilustración 16. Comparativa datos vs Modelo flujo | 31 |
| Ilustración 17. Componentes del Sistema de olfato Implementado | 33 |
| Ilustración 18. Autómata del Proceso | 36 |
| Ilustración 19. Autómata FYD | 37 |
| Ilustración 20. Autómata FYC | 37 |
| Ilustración 21 Autómata V1 | 38 |
| Ilustración 22. Autómata V2 | 38 |
| Ilustración 23. Simulación interacciones Autómatas. | 38 |
| Ilustración 24. Programa estructurado a partir de supremica | 40 |
| Ilustración 25. circuito eléctrico etapa de Potencia..... | 41 |
| Ilustración 26. Configuración típica sensores de gas MQ de hoja de datos | 43 |
| Ilustración 27. Respuesta Transitoria del sistema | 45 |
| Ilustración 28. Respuesta estado estable | 45 |
| Ilustración 29. Grados de Tostion del café..... | 46 |
| Ilustración 30. Respuesta de la matriz de sensores con esencia de banano- diferentes volúmenes | 47 |
| Ilustración 31. Respuesta de la matriz de sensores con esencia de café- diferentes volúmenes | 49 |
| Ilustración 32. Análisis de componentes principales del sensor MQ4, con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes | 52 |
| Ilustración 33. Análisis de componentes principales del sensor MQ6, con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes | 53 |
| Ilustración 34. Análisis de componentes principales del sensor MQ8. Con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes | 55 |
| Ilustración 35. Análisis de componentes principales del sensor M Q135, con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes | 56 |
| Ilustración 36. Análisis de componentes principales del sensor M Q135a, con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes | 57 |
| Ilustración 37 Análisis de componentes principales de la matriz de sensores del sistema de olfato electrónico..... | 58 |
| Ilustración 38 comportamiento de los puntajes (score) del sistema de olfato electrónico | 59 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El café.

El café es una de las bebidas más aromáticas del mundo, los compuestos volátiles del café son numerosos y varían la calidad, potencia y concentración del aroma, sus propiedades sensoriales distintivas son un aspecto ligado a cada uno de los eslabones de la cadena de producción, algunos de los factores con mayor influencia en el producto final son: el origen geográfico, el clima, la especie, métodos de cosecha, tecnología en los procedimientos (principalmente en el tostado y molido), condiciones de almacenamiento, y no menos importante, el método de preparación de la tasa [1]. Por ejemplo, en el proceso de tostado, el grano experimenta innumerables reacciones químicas y físicas que definen el perfil de las características del café que serán trasladadas a la taza, si bien se han realizado estudios acerca del proceso de tuestión, todavía queda mucho por descubrir y el arte de un maestro tostador experimentado sigue siendo un requisito para lograr una taza de café de calidad [2][1].

Por más de 400 años, la cata del café fue un arte informal transferido a través de generaciones. En 1984 con la publicación escrita por Ted R. Lingle por parte de la SCAA (Asociación de Café Especial de Norte América), se buscó llevar el arte experimental de *la cata del café a una ciencia* basada en los *aspectos físico químicos* del café, tales como: *El aroma derivado del tueste, su aroma al ser extraído cuando se vierte agua casi hirviendo sobre él* (el radio de aroma de ambas fases cambia con la temperatura), luego se encuentra *el sabor* del café como una especial combinación entre las sensaciones en la lengua, causadas por las *moléculas disueltas* en la bebida, y la sensación retro-nasal en la nariz causada por las moléculas gaseosas, luego se encuentra *la sensación* que se produce por cualquier *residuo en la lengua*, se evalúa también *la acidez* de la bebida detectada en la lengua y *el cuerpo* de la bebida [1].

Es así como para la versión final del proceso de cata de café se tienen 10 atributos a considerar cada uno de los cuales aporta un puntaje máximo de 10 puntos tal que la evaluación se basa en una escala de 100 puntos lo que permite que personas ajenas a la industria del café puedan hacerse fácilmente a una idea sobre la calidad del café en cuestión (*Ilustración 1*), así la versión

final de cata de café incluye los atributos de : 1) fragancia/aroma, 2) sabor, 3) sobre-gusto, 4) acidez, 5) cuerpo, 6) uniformidad, 7) balance, 8) limpieza de copa, 9) dulzura, 10) análisis general; como se puede apreciar aun establecido un protocolo, la cata de café sigue siendo un proceso ligado a la subjetividad humana, a las capacidades y entrenamiento del catador [3], además no todos los catadores están capacitados para encontrar cada defecto en una taza de café, lo que ocasiona muchas veces pérdidas de tiempo y de dinero. Es debido a esto que surge la necesidad de estandarización a partir de la caracterización del café donde los datos no se vean afectados por factores externos [4].

Specialty Coffee Association of America Coffee Cupping Form

Name: _____
Date: _____

| Quality scale: | | | |
|----------------|------------------|------------------|--------------------|
| 6.00 - Good | 7.00 - Very Good | 8.00 - Excellent | 9.00 - Outstanding |
| 6.25 | 7.25 | 8.25 | 9.25 |
| 6.50 | 7.50 | 8.50 | 9.50 |
| 6.75 | 7.75 | 8.75 | 9.75 |

Sample # _____

Roast Level of sample: _____

Score: _____

Fragrance/Aroma: _____

Flavor: _____

Acidity: _____

Body: _____

Uniformity: _____

Clean Cup: _____

Overall: _____

Total Score: _____

Notes: _____

Final Score: _____

Ilustración 1. Puntuación protocolo SCAA para cata de café

1.2 Sistemas de olfato electrónico

Los sistemas de olfato electrónico se vienen usando desde hace ya algunas décadas en aplicaciones tanto de interés técnico como comercial así como en, la industria alimenticia, la seguridad pública y aplicaciones espaciales son algunos campos de aplicación [5].

Una nariz electrónica, es un dispositivo capaz de detectar compuestos orgánicos volátiles (VOCs) gracias a una muestra portadora entregada al sistema, una matriz de sensores de compuestos químicos, circuitos electrónicos y un software para análisis de la información [6].

Estos sistemas imitan de una manera extremadamente simplificada el principio de funcionamiento del sistema olfativo de los mamíferos.

En cuanto a su construcción cabe destacar que son dispositivos cuyos materiales de construcción tienen costos moderados y que su aplicación depende en gran medida del tratamiento o análisis que se le puede dar a las señales generadas.

La nariz electrónica toma sus principios de funcionamiento imitando los mecanismos biológicos del sistema olfatorio. Conceptualmente consta de: (1) La unidad de concentración de muestra (nariz) para entregar la mezcla gaseosa, (2) El arreglo de sensores (células receptoras olfatorias), (3) un circuito electrónico para recolectar las respuestas de los sensores (axones, bulbos olfatorios, células mitrales y nervios olfatorios) y (4) herramientas software para el análisis estadístico de datos (cerebro). Su fin es la detección de compuestos orgánicos volátiles presentes en una determinada muestra.

A continuación, se hace un resumen de los principales aspectos y avances relacionados a los componentes principales de un sistema de olfato electrónico.

1.2.1 Detección.

“Los sensores químicos son dispositivos capaces de convertir una información química que va desde la concentración de partículas específicas como átomos, moléculas, o iones, en gases o líquidos, hasta el análisis de composición total, en una señal analíticamente útil”. El punto clave para el desarrollo de un sensor químico está relacionado con los materiales utilizados para reconocer y transducir la información química a través de una interacción o reacción química [7]. Entre dichos sensores, aquellos capaces de responder a moléculas de olor en fase gaseosa han sido usados para aplicaciones de nariz electrónica.

Las muestras gaseosas por lo general son mezclas de compuestos orgánicos con diferentes masas molares relativas. En la tabla 1, se muestran algunos de los sensores que han sido usados a lo largo de los años, entre ellos los sensores basados en Metales Óxidos (MOx), polímeros

conductivos o transistores de efecto de campo. Sin embargo frente a las limitaciones de aplicación por su baja sensibilidad (desde ppm a ppb) en comparación a la humana que van desde ppt [8], se ha venido desarrollando desde la década 1990 un concepto más avanzado de dispositivos de detección [9], el cambio es usar receptores de olor OR's (Olfactory Receptors) como material perceptor, este nuevo dispositivo es llamado nariz bioelectronica, habilitado con proteínas receptoras de olor combinadas con dispositivos de detección que permiten transducir la señal biológica en señales electrónicas u ópticas [10], en la *ilustración 10* se aprecia una comparativa entre los sistemas de olfato natural y los sistemas de olfato electrónico y bioelectronica.

El avance y el carácter multidisciplinar de la nanotecnología ha permitido llevar a cabo novedades en materia de sensores, en particular los biosensores, para crear lo que se denomina la nariz bioelectronica [11]. cuando los receptores olfatorios actúan como elementos reconocedores de olor, los sensores se benefician de su selectividad hacia los odorantes, permitiendo distinguir precisamente una determinada molécula en una mezcla gaseosa, además su sensibilidad es mayor, desde rangos de concentración femtomolares en condiciones liquidas, y ppt en condiciones gaseosas, lo que los hace útiles en más aplicaciones como el diagnóstico de enfermedades [12], [13] y la monitorización de ambientes y comida [14].

Los sensores usados en este tipo de nariz están comprendidos por dos elementos, ambos conversores, el primero es el construido a partir de receptores Olfatorios los cuales pueden ser células, péptidos y proteínas y/o nano-vesículas, un resumen de sus ventajas y desventajas es mostrado en la tabla 2, el segundo es un dispositivo no biológico, la generación de la señal ocurre como resultado del contacto entre la sustancia y el receptor, diferentes tipos de transductores son usados en la identificación de señales bioquímicas específicas, entre ellos los de clase electroquímica, de resonancia y óptica [16].

| Principio | Medida | Tipo de Sensor | Método de Fabricación | Disponibilidad/ sensibilidad | Ventajas | Desventajas |
|------------------|------------------------|-------------------------|---|-----------------------------------|---|----------------------------------|
| Conductométrico | Conductancia | MOS | Micro fabricación Sputering | Comercial, 5-500 ppm | Barato, Micro fabricación | Opera a altas temperaturas. |
| | | Polímero Conductivo | Micro fabricación Galvanoplastia, Plasma CVD, impresión de pantalla, recubrimiento por centrifugación | Comercial, varios tipos 1-100 ppm | Micro fabricación , opera en temperatura ambiente | Sensibilidad a la humedad |
| capacitivo | Capacitancia | Polímero | Micro fabricación Recubrimiento por centrifugación | En investigación | Aplicación a CMOS based chemosensor | Sensibilidad a la humedad |
| potencio métrico | Voltaje | diodo schotcky | Micro fabricación | En investigación | Integrado | Caro |
| | | MOSFET | | | | |
| calorimétrico | Temperatura | Termocupla Pellistor | Micro fabricación | En investigación | Bajo costo | Respuesta lenta |
| | | Termistor Piroelectrico | | | | |
| Gravimétrico | Piezo-electricidad | QMC SAW | Micro fabricación | Comercial 1 ng de cambio de masa | Buen entendimiento de la tecnología | Fabricación Microelectrónica |
| óptico | Índice de Refractancia | SPR Fluorescencia | Micro fabricación | En investigación | | Alta inmunidad a ruido eléctrico |
| Amperométrico | Corriente | Electro catalítico | Electrodos | Comercial ppb, ppm | Bajo costo | Tamaño |

Tabla 1. Principales sensores usados en nariz electrónica.[15]

Tabla 2. Materiales biológicos usados en narices bioelectronicas. Modificado de [16].

| TIPO DE MATERIAL BIOLÓGICO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|----------------------------|--|--|
| Células OR's | Genera señales que pueden ser similares a las obtenidas por ORN's. Adecuado para absorción física | Aplicabilidad limitada con algunos transductores secundarios. Difícil de manufacturar y almacenar |
| Proteínas y péptidos OR's | De uso simple en practica Alta sensibilidad mientras se usa toda la proteína. Posibilidad de producción a gran escala. Almacenamiento relativamente fácil. | Difícil de inmovilizar en el transductor secundario. |
| Nano vesículas OR's | Genera señales parecidas a las generadas por las células. Las propiedades de las células y las proteínas en cuanto a tiempo de almacenamiento largo y producción en masa. Muy útil en combinación con nano materiales. | Baja estabilidad. Proceso complejo de preparar el tratamiento con las sustancias apropiadas y desestabilización de la membrana. |

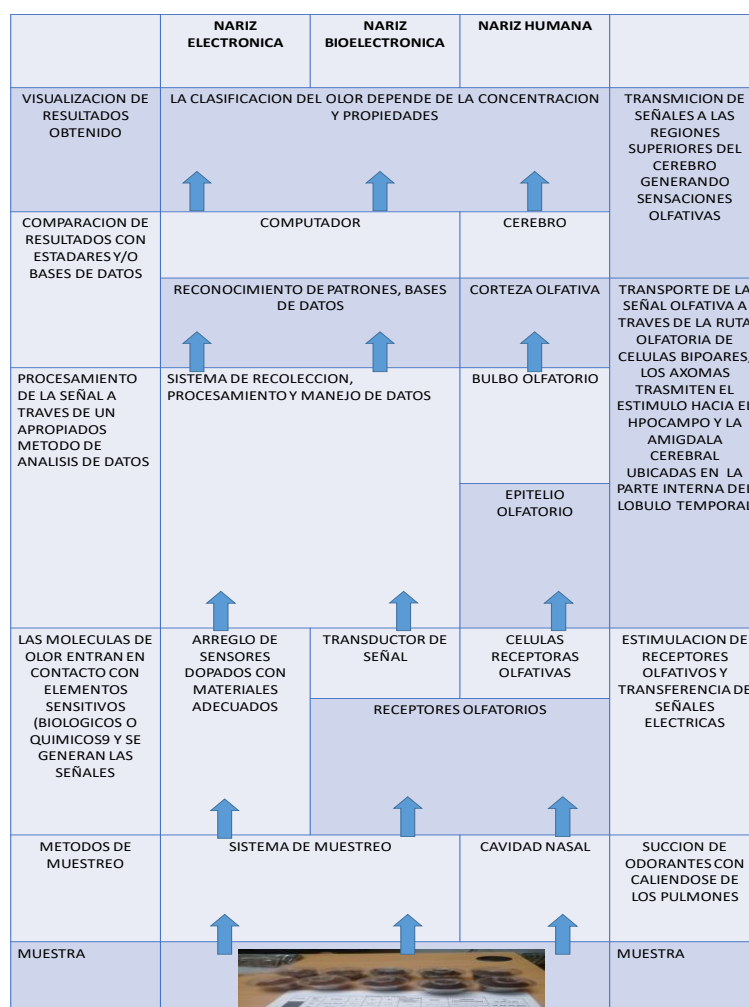


Ilustración 2. Comparativa sistema olfatorio, nariz electrónica y nariz bioelectronicas [15]

1.2.2 Acondicionamiento de señal y pre-procesado.

Una vez determinada la matriz de sensores se cuenta con varias etapas que permiten obtener información adecuada para el proceso de análisis de patrones, algunos circuitos de interface hacen parte de estas etapas y son utilizados para transducir la respuesta del sensor en señales eléctricas, un adecuado circuito depende del tipo de sensor empleado, entre ellos, por mencionar un ejemplo, se encuentran los circuitos divisores de voltaje o los puentes de *wheatstone* para sensores químico resistivos; Sin embargo las señales generadas aun no son adecuadas para su tratamiento en computadora por lo que es adecuado aplicar una etapa de acondicionamiento en donde la señal puede ser, amplificada, filtrada, compensada, según se requiera. En la *ilustración 3* por ejemplo, se aprecian circuitos analógicos de filtro pasa bajo.

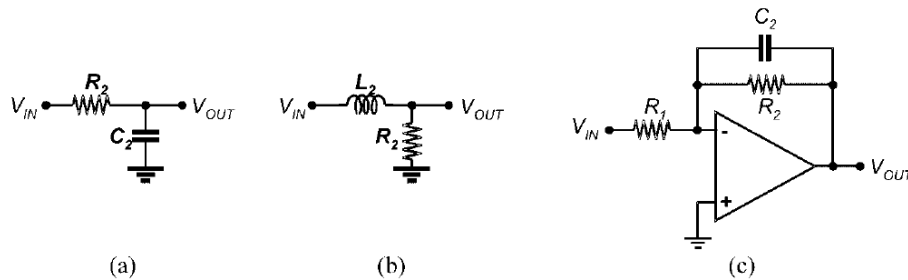


Ilustración 3. Filtro pasa bajo (a y b) pasivo (c) activo[15]

Luego de un adecuado acondicionamiento las señales de la matriz de sensores se muestrean y discretizan, para obtener los datos el ingrediente primordial para la identificación, los datos experimentales, con estos se puede iniciar el pre procesamiento de la señal, la primera etapa computacional después de que la señal ha sido muestreada y almacenada en memoria, “su objetivo es extraer la información relevante de la respuesta de los sensores y preparar los datos para el análisis de patrones”[15], puede comprender tres etapas generales, la manipulación de línea de base, la compresión y la normalización.

1.2.3 Análisis de Patrones

El análisis de patrones en los sistemas de olfato electrónicos está ligado al análisis de datos multivariado, los métodos paramétricos basados en el supuesto de que la respuesta del sensor puede ser descrita por una función de probabilidad de densidad, utilizan técnicas estadísticas

con las que se busca encontrar una relación matemática que relacione las entradas del sistema y sus salidas: vectores de olor, clases y descriptores, entre estas técnicas se encuentran: El análisis de componentes principales (PCA), mínimos cuadrados parciales (PLS), regresión lineal múltiple (MLR), regresión de componentes principales (PCR), análisis de función discriminante (DFA), análisis de discriminante lineal (LDA), análisis de conglomerados (CA), como también vecinos más cercanos (NN). Además de estas también se han *desarrollado metodologías no paramétricas, biológicamente inspiradas*, entre las que encontramos: las redes neuronales artificiales (ANNS), el perceptrón multicapa (MLP), sistemas de inferencia difusa (FIS), algoritmos genéticos (GA), teoría de resonancia adaptativa (ART), sistemas neuro-fuzzy (NFS).[15].

También se han usado métodos de análisis supervisados y no supervisados, en la técnica supervisada un conjunto de olores conocidos es sistemáticamente introducido en el sistema de olfato, con lo que se trabaja con una base de datos de descriptores conocidos, los olores desconocidos son analizados usando relaciones encontradas con la base de datos inicial, pueden usarse etapas de calibración, aprendizaje o entrenamiento. La *ilustración 4* resume las principales técnicas de análisis multivariado de datos.

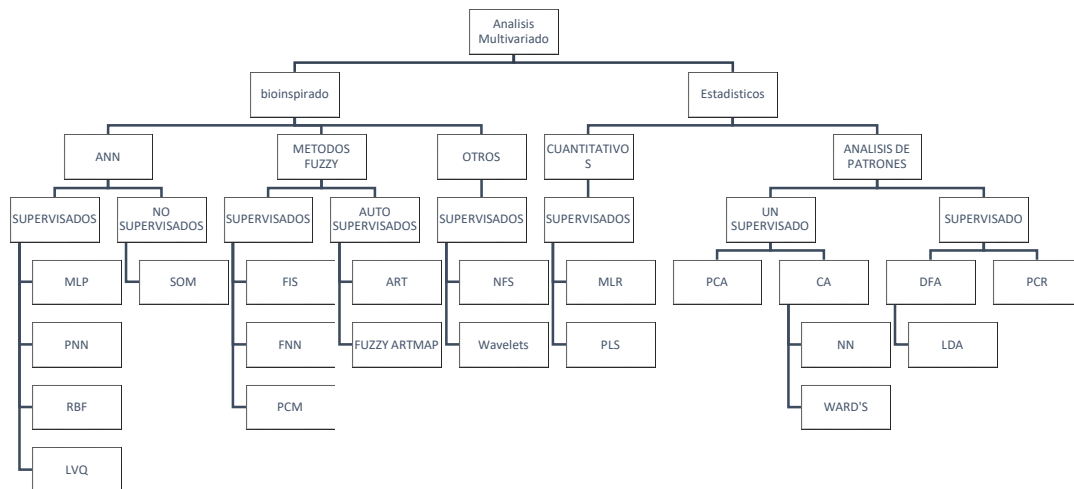


Ilustración 4. Técnicas de Análisis Multivariado [16]

1.2.4 Aplicaciones de sistemas de nariz electrónica:

Con el desarrollo de nuevos tipos y arreglos de sensores para nariz electrónica, se ha ampliado igualmente su campo de aplicación, el análisis preciso de una nariz electrónica depende de varios factores, como el tipo de sensor, los algoritmos de reconocimiento de patrones, el desarrollo de software, materiales de construcción, algunas industrias donde la nariz electrónica ha sido usada son:

- **Industria agrícola** donde se consiguió la identificación de siete especies de bacterias patógenas en plantas al analizar los componentes volátiles producidos por cultivos puros y llevando a cabo un análisis de función discriminante (DFA)[17].
- **Industria biomédica** para la detección de enfermedades y patologías, pues se sabe que el ser humano genera un número de compuestos orgánicos volátiles y no volátiles los cuales están influenciados por la dieta, el estrés, las enfermedades, y el estado de inmunidad del individuo. La nariz electrónica puede ser usada para diagnosticar un amplio rango de enfermedades, como el asma [18], cáncer de pulmón con una nariz bioelectronica basada en nano vesícula [19], entre otros.
- **Industria alimenticia** en donde se han encontrado diversas aplicaciones, generalmente en el aseguramiento de la calidad y la inocuidad de los alimentos, por ejemplo el uso de una nariz electrónica, para la categorización de queso parmesano en sus diferentes etapas de maduración así como la contaminación de la leche gracias a la presencia de etanol, ácido acético y acetaldehído [17]. También el uso de una nariz bioelectronica, con biosensores de nano-vesícula y transistor de nanotubo de carbón, que imita la respuesta de la nariz canina para indicar la oxidación de la comida, logrando una excelente selectividad y demostrando que la plataforma de sensor utilizada es útil en el desarrollo de posibles dispositivos de detección [20].
- Se han encontrado aplicaciones para estandarización de olores [9], visualización de olores [21] y el desarrollo de códigos para cada olor, en la detección de explosivos, tóxicos y drogas[22], y aplicaciones en la industria de los cosméticos y perfumería [8].

1.2.5 Aplicaciones de Sistemas de Nariz Electrónica al proceso del Café

La mayoría de los compuestos volátiles del café se derivan de componentes no volátiles del grano crudo, y se forman durante el tostado para generar una mezcla compleja de aromas. Por lo general, se considera que los granos de café verde no tienen un aroma o sabor agradable, pero poseen una gran cantidad de compuestos volátiles, la mayoría de los cuales aumentan en concentración durante el tostado del café, aunque hay una minoría que tiende a degradarse [23].

En [4] se hace un análisis a muestras de café tostado para la detección y clasificación de defectos utilizando una matriz de ocho sensores de gas de Metal-Oxido (sensores TGS) de transducción conductiva. La adquisición de los datos se realizó a través de una tarjeta de adquisición de datos DAQ USB6009 y aplicando un análisis de principales componentes, se encontró que este tipo de nariz electrónica es adecuada para su uso en aplicaciones del café tostado, presentando adecuada selectividad y sensibilidad frente a las muestras, no así para identificar granos de café verde por su escasa cantidad de compuestos volátiles, el estudio se realizó para el café producido en norte de Santander, Colombia. En [6] se realiza una clasificación de datos de olor de café provenientes de una nariz electrónica usando redes neuronales feedforward, siguiendo un proceso de validación cruzada de 10 particiones, mostrando que el sistema fue capaz de identificar correctamente un 100% en resultado promedio y un 88.88% en resultado final, con datos desconocidos.

En [23] se referencia el trabajo realizado por M. Pardo. para la clasificación de café, lográndolo en un 87.5% usando PCA que luego se usó como entrada a una red feed forward perceptrón multicapa (MLP) usando cuatro sensores de película fina de SnO₂. Sin embargo, se encontró que para el café líquido no hubo éxito por la dificultad de reproducir las condiciones de la muestra.

En [24] una combinación de nariz y lengua electrónicas fue usada para caracterizar y clasificar 7 tipos de café robusta chino con diferentes niveles de tostado, se usó una red neuronal artificial back-propagation y un análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales, encontrando que este último fue el método con mejores resultados para la caracterización.

1.2.6. Objetivos

De acuerdo a lo anteriormente expuesto se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo General:

Evaluar un sistema de nariz electrónica en cuanto su viabilidad para identificar atributos sensoriales de fragancia y aroma del café tostado.

Objetivos Específicos:

1. Desarrollar un prototipo de nariz electrónica con capacidad para la detección de los componentes orgánicos volátiles (VOC) característicos del café tostado.
2. Cuantificar la correlación existente ente los VOC detectados por el sistema de nariz electrónica construido, y los atributos sensoriales de fragancia y aroma, sobre un conjunto representativo de muestras de café tostado.
3. Determinar la capacidad del sistema en cuanto a su capacidad para la detección y clasificación de la fragancia y aroma del café tostado de acuerdo a la escala de calidad del protocolo SCAA.

Para dar cumplimiento a estos objetivos, se tuvo en cuenta que los avances y estudios sobre sistemas de olfato electrónico muestran una capacidad de aplicación prometedora, el avance de la tecnología, el uso de nuevos materiales y la capacidad de tratamiento de datos, han permitido lograr aplicaciones importantes en diferentes áreas, la literatura encontrada muestra investigaciones realizándose a la fecha que apuntan a la mejora de la selectividad y sensibilidad de estos sistemas. En cuanto a su aplicación a la cadena productiva del café, se han hallado aportes de la nariz electrónica en diferenciar tipos de café, o en hallar defectos del proceso del café. A diferencia de esos trabajos, en este proyecto se está interesado en evaluar la viabilidad de aplicar un sistema de nariz electrónica en procesos de evaluación de atributos sensoriales de fragancia y aroma del café tostado, de forma análoga la evaluación que realizan los catadores humanos en un protocolo específico, a saber, el protocolo SCAA.

Se debe aclarar que se está hablando de un estudio de viabilidad, precisamente porque a la fecha no se conoce de estudios que muestren que el objetivo buscado sea posible. De hecho, el proceso de detección de compuestos volátiles es complejo, y seguramente será viable lograr el desempeño logrado por los catadores humanos solo de manera parcial. Para una mejor comprensión de esta complejidad, en la *ilustración 5*, se muestran algunos de los compuestos químicos que son importantes en el establecimiento del aroma del café.

La investigación permitió cuantificar la viabilidad del uso de este tipo de sistemas electrónicos para contribuir a la solución del problema de reducción de la subjetividad de evaluación sensorial que introducen los expertos humanos en este campo, permitiendo diagnósticos más precisos acerca de la calidad del café tostado. Además se aborda el planteamiento de una primera relación entre el aroma y fragancia con algunos de los componentes representativos del café, como se muestra en la ilustración 5, sin necesidad de usar instrumentación como espectrómetro de masas, FTIR u otros usados en quimiometría.


| | | | |
|--|---|---|---|
| Furanos Caramelo, paja, césped, azúcar quemado, almendra, ahumado, astringente, café tostado, frutal | Pirazinas Chocolate, tierra, mohoso, nuez, tostado, graso, maíz, alquitrán, pimentón, maní, rancio | Oxazoles Almendra, leguminosas, dulce, avellana, tierra, papa, verde | Piridinas Amargo, astringente, caramelo, mantequilla |
| Tioles Café tostado envejecido, descompuesto, animal, carne asada |  | | Cetonas Mantequilla, caramelo, dulce, miel, frutal, manzana cocida, floral, graso, rancio, madera |
| Tiofenos Cebolla, mostaza, fétido | | | Pirroles Dulce, maíz, cereal, aceite, medicinal, setas comestibles, graso, nuez |
| Tiazoles Tierra, papa, verde, nueces | | | Hidrocarburos Fétido, petróleo, tabaco, manteca, terroso, madera |
| Ésteres Frutal, dulce, graso, rancio, irritante, floral | Fenoles Tabaco, ahumado, clavo, fenólico, quemado, caucho astringente, amargo, picante, terroso, madera | Aldehídos Vinoso, miel, cocido, tostado, graso, madera, verde, malta, ácido, fermentado, picante, dulce, herbal, papas cocidas, frutal, vainilla, picante, quemado, tostado, rancio | Alcoholes Floral, dulce, frutal, mohoso, tierra, tostado, verde, herbal, rancio |
| Lactonas Melocotón, coco, nuez, dulce, especia, quemado, graso | Ácidos Vinagre, dulce, rancio, floral, mentolado, frutal, verde herbal, graso, rancio, mohoso, terroso | Aminas Desagradable, penetrante, descompuesto, pescado, amoníaco | Piranos Dulce, eucalipto |

Ilustración 5. El Olor y Composición química del café

2. DESARROLLO DE SISTEMA DE OLFATO ELECTRÓNICO

2.1 Introducción

La hipótesis del presente proyecto es que un sistema de olfato electrónico podría servir como herramienta en el proceso de cata para verificar la calidad del café pues existen aplicaciones de nariz electrónica donde se analizan y relacionan los componentes orgánicos volátiles en el café tostado con aspectos que dan cuenta de su calidad [7]. Es así que se propone un sistema con el cual se espera detectar y clasificar características sensoriales de la muestra de café, específicamente su aroma y fragancia, de aquí surge la pregunta investigativa que se plantea en este proyecto: ¿Qué atributos sensoriales de fragancia y aroma del café tostado se pueden identificar con un sistema de nariz electrónica?

Los primeros sistemas de olfato experimentales fueron desarrollados a finales de los años ochenta. Ya son más de dos décadas de investigación y perfeccionamiento de este tipo de sistemas, y aunque distan mucho de las características selectivas y sensitivas del sistema de detección química del olfato y gusto biológicos (habilitados para detectar y discriminar una amplia cantidad de sustancias en ambientes complejos), existen en la literatura un número cada vez mayor de contribuciones a los fundamentos teóricos de la operación y aplicaciones prácticas de los SOE, estos sistemas han sido desarrollados siguiendo el paradigma de los sistemas de olfato biológicos, luego se parte de este planteamiento para el diseño de un sistema de olfato electrónico de bajo costo habilitado para detectar, a través de un arreglo de sensores de gas, compuestos orgánicos volátiles de muestras de café a fin de realizar una caracterización de la dinámica de dichos sensores frente a diferentes muestras de olor, con el análisis computacional de esta base de datos se busca identificar características de olor y fragancia en muestras de café. A continuación, se describen las partes del sistema de olfato electrónico propuesto.

2.2 Metodología.

La metodología adoptada en este proyecto, desarrolló tres fases en las que se buscaron obtener las características de las muestras a detectar, así como los métodos del experimento de toma muestra y los aspectos técnicos de análisis de datos y correlación.

2.1.1 Selección de Muestra

1. Se seleccionan 200 g de café por cada lote de la unidad productiva SUPRACAFÉ ubicada a 1900 msnm-. tipo Almendra Variedad castillo, con procesos de cadena de producción (*ilustración 7*) estandarizados. El tostado de cada lote de café sigue el Protocolo de la SCAA para los procesos de tostado y se realiza en 8 niveles de tueste según la escala AGTRON.
2. El tostado del café se efectúa con un Horno Probat, se obtienen 8 muestras de café tostado en grano y 8 tostado molido para un total de 16 muestras de café tostado.

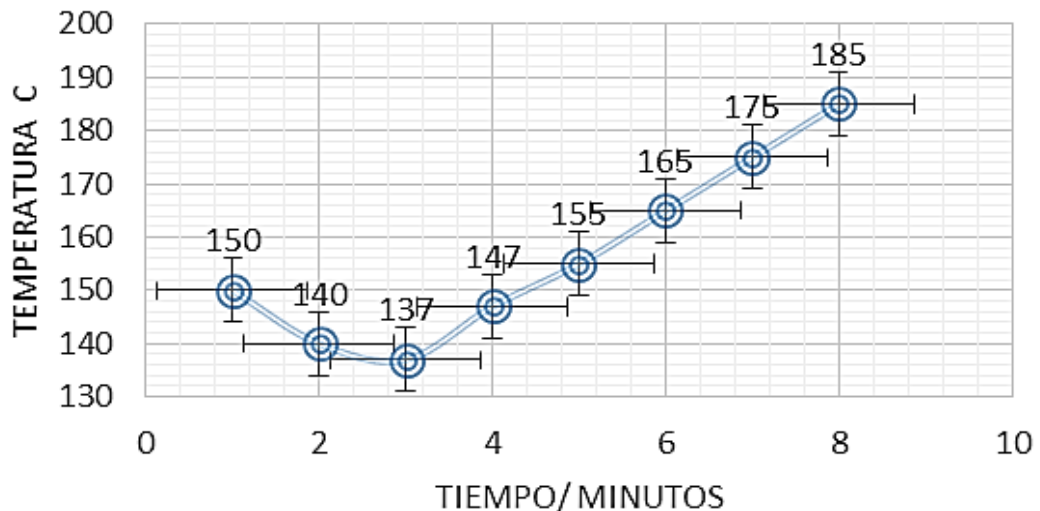


Ilustración 6. Proceso de tostado [29]



Ilustración 7 Trazabilidad muestra de café [29]

3. Muestras de café tostado en triplicado, el proceso de muestreo se plantea siguiendo un **diseño completamente al azar** en el que sólo se considera dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio.

2.2.2 Levantamiento de requerimientos y Selección de variables.

Se identifican las variables asociadas intrínsecamente a las características de aroma y fragancia del café, las cuales han sido investigadas sistemáticamente en las últimas décadas, y gracias al avance de técnicas analíticas se han detectado más de 900 componentes en la fracción volátil del café, donde solo algunas decenas son relevantes en la composición del aroma.

El impacto sensorial de un compuesto aromático depende básicamente de dos factores: su concentración y su umbral de percepción. El umbral de percepción es la concentración mínima del compuesto necesaria para que pueda ser percibida por el humano, cuanto más bajo sea, mayor impacto sensorial tendrá el compuesto [25].

La concentración de estos compuestos es variable, hay diferencias relevantes entre las distintas especies de café y según el grado de tueste, algunos de estos componentes se pueden observar en la *ilustración 8*.

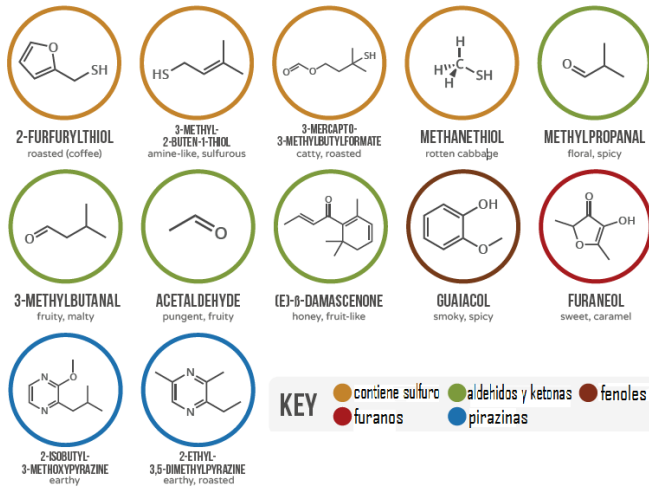


Ilustración 8. componentes aroma de café [25]

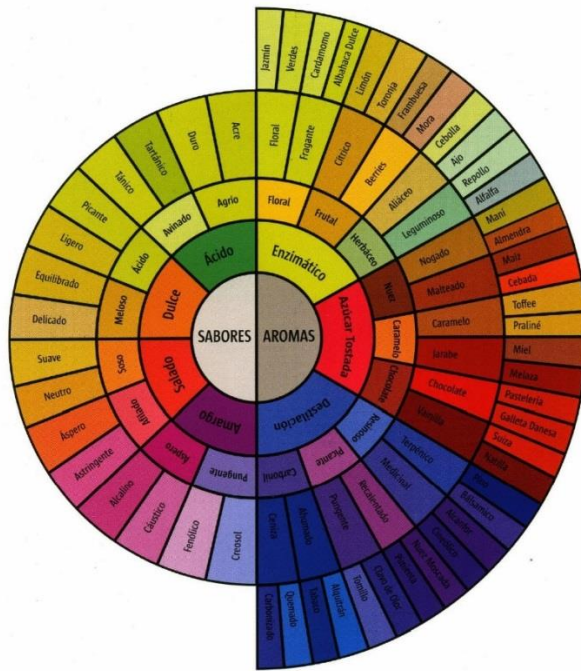


Ilustración 9. Rueda de Cata café

| Fabricante Winsen | Gas detectado | Fabricante Figaro | Gas detectado | Sensibilidad (ppm) |
|-------------------|--|-------------------|---------------------------------|--------------------|
| MQ-2 | CO ₂ | TGS2600 | H ₂ , CO y VOCs | 1-30 |
| MQ-3 | Alcohol | TGS2620 | VOCs | 1 -30 |
| MQ-4 | Gas natural, metano | TGS2611 | VOCs | 500-10000 |
| MQ-5 | GLP, gas natural, gas de carbón | TGS2610 | VOCs | 500-10000 |
| MQ-6 | GLP, propano | TGS822 | VOCs | 500-10000 |
| MQ-7 | Monóxido de carbono (CO) | TGS2602 | VOCs | 50-5000 |
| MQ-8 | Hidrógeno | TGS821 | H ₂ | 5-100 |
| MQ-9 | CO y Gas Combustible | TGS4161 | CO ₂ | 350-10000 |
| MQ303 | Alcohol | TGS826 | NH ₃ | 30-300 |
| MQ131 | Ozono O ₃ | TGS2201 | NO y NO ₂ | 0.1-10 |
| MQ135 | Control de calidad del aire (NH ₃ , Benceno, alcohol, humo) | TGS800 | Calidad del aire, humo, benceno | 50-5000 |
| MQ136 | Hidrógeno sulfurado (H ₂ S) | TGS825 | H ₂ S | 10-1000 |
| MQ137 | Amoníaco (NH ₃) | TGS826 TGS2444 | Amoniaco | 30-300 10 ~ 300 |
| MQ138 | VOC (añejo, benceno, aldehído, cetona, éster) | | | |

Tabla 3. Selección de sensores

El diseño completamente al azar consiste, para este caso, de la *variable de respuesta* que son las señales de la matriz de sensores, *la unidad experimental* es la cámara de detección y *el factor* es el volumen de la muestra. En este caso se trata de un diseño balanceado porque se han realizado el mismo número de repeticiones (3) para cada uno de los tratamientos (volúmenes).

Este tipo de diseño se llama completamente al azar porque todas las repeticiones experimentales se realizan en orden aleatorio completo. Si durante el estudio se hacen N pruebas, éstas se deben realizar al azar, de forma que los posibles efectos ambientales y temporales se vayan repartiendo equitativamente entre los tratamientos.

El número de repeticiones a realizar en cada tratamiento depende de la variabilidad que se espera observar en los datos, a la diferencia mínima que el experimentador considera que es importante detectar y al nivel de confianza que se desea tener en las conclusiones. Normalmente se recomiendan entre 10 y 30 mediciones en cada tratamiento. Con 10 mediciones se podrían detectar diferencias de medias mayores o iguales a 1,5 sigmas con una probabilidad alta, y con 30 mediciones se podrían detectar diferencias mayores o iguales a 0,7 sigmas.

Se usa el análisis de la varianza (ANOVA) para comprobar si existen diferencias en las medias. Fundamentalmente este análisis consiste en separar la contribución de cada fuente de variación en la variación total observada. Sin embargo, éste ANOVA está supeditado a los siguientes supuestos que deben verificarse:

1. Normalidad
2. Varianza constante (igual varianza en los tratamientos)
3. Independencia

2.3 Partes del sistema propuesto

En base a los mecanismos del sistema de olfato biológico humano (*Ilustración 11.*) se diferencian los siguientes procesos:

El primer proceso llevado a cabo por el sistema olfatorio humano es aspirar el olor para posicionarlo en la cavidad nasal con el fin de que se den interacciones con los receptores olfatorios, las moléculas de olor son disueltas por la capa mucosa antes de esta interacción donde también se acondiciona su temperatura, además debe alcanzarse un umbral adecuado de moléculas de olor, a partir de lo cual las reacciones químicas se transducen en estímulos eléctricos, las cuales son transportadas al bulbo olfatorio, luego de lo cual se transforma en información de olor en la corteza olfativa y es transportada a diferentes partes del cerebro.

El respirar aire fresco permite una limpieza de la cavidad nasal al diluir las moléculas de olor disminuyendo su concentración hasta umbrales imperceptibles. [5]

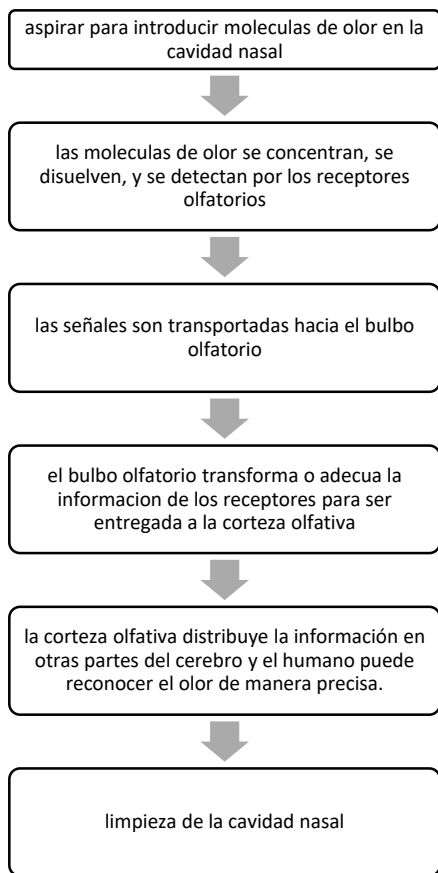


Ilustración 11 Proceso sistema olfatorio [5]

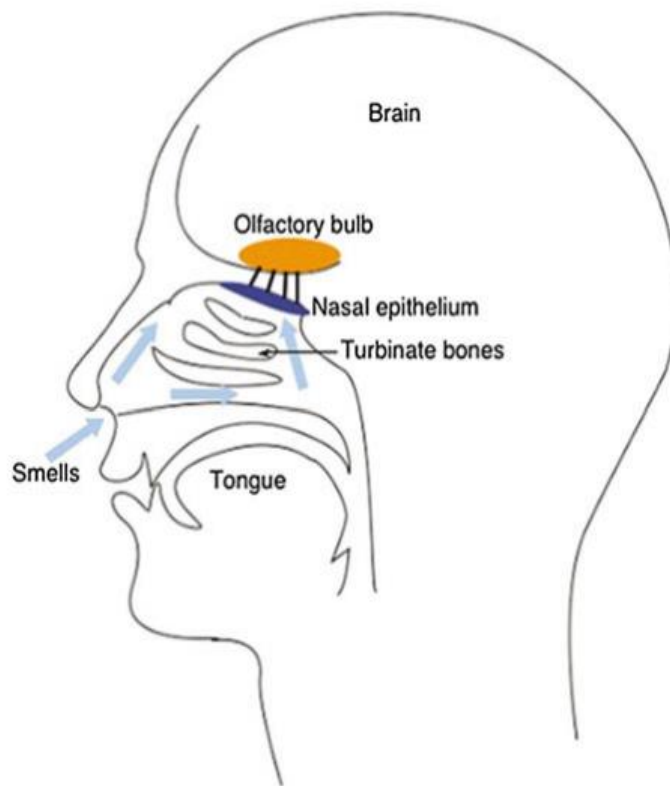


Ilustración 10. Sistema Olfativo [15]

Fue así como se identificaron los procesos análogos que se deben llevar a cabo por el sistema de olfato, indicados en la ilustración 12, y donde secuencialmente se trabajó de la siguiente forma:

- Adecuación de la muestra (concentración, temperatura).
- Sistema de entrega de muestra hacia la matriz de sensores.
- Las interacciones de los compuestos orgánicos volátiles son transducidas a señales eléctricas a través de circuitos eléctricos.
- Se realiza el pre-procesamiento de las señales en pro de tener datos adecuados al método de análisis de datos.
- Análisis y clasificación de datos
- Limpieza del sistema.

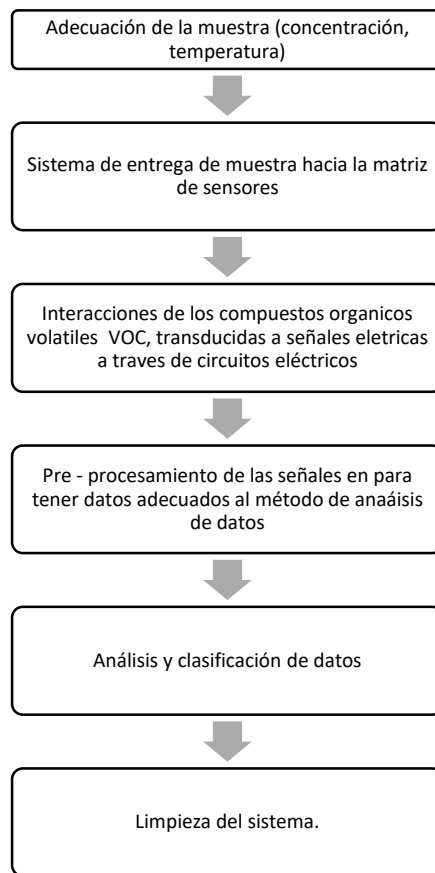


Ilustración 12. Procesos sistema de olfato electrónico[5]

2.4 detección:

Concentración y

A través de un tiempo de concentración es posible mejorar la sensibilidad y selectividad del arreglo de sensores [17], para lo cual se estableció el uso de una cámara de vidrio de tal manera que permitiera hacer una limpieza adecuada. A través de un *gas de acarreo* inyectado a la entrada del sistema permite transportar la concentración de compuestos orgánicos volátiles hacia la cámara de detección donde se ubica la matriz de sensores [15], el volumen de cada cámara es de aproximadamente de 1670 mililitros, capacidad suficiente para generar una concentración adecuada para ser detectada por el arreglo de sensores, de acuerdo a las características de detección de los sensores, previamente caracterizados. El modelamiento de los volúmenes, cámara concentradora y cámara de detección, se muestran en la ilustración 13.



Ilustración 13. Cámaras de concentración y detección.

2.2.2 Sistema de entrega de muestra

Para los estudios que exploran los mecanismos biológicos con los cuales los humanos percibimos y detectamos los olores se idearon varios tipos de sistemas de entrega de muestra, buscan generar, entregar y controlar los estímulos químicos hacia las cavidades nasales. Se concluyó que con el humano ejecutando la evaluación sensorial, la mejor manera de entregar una muestra en la cavidad nasal, es gracias a la aspiración natural [15]; Para los sistemas de olfato electrónicos es preciso establecer mecanismos que permitan adecuar y entregar la muestra. Para esto basados en diferentes trabajos de olfato electrónico, se propone un sistema de flujo de muestra con el cual conectar las cámaras, para que, una vez alcanzada la etapa de concentración, sea posible transportar la muestra haciendo fluir un gas de acarreo dentro del sistema y propiciando las interacciones con la matriz de sensores, además este sistema debe permitir realizar la limpieza de las cámaras de detección y concentración.

A fin de representar información de la ingeniería de proceso, características mecánicas y de instrumentación del sistema de olfato electrónico, se hace uso de un diagrama de instrumentación y tuberías o P&ID (por sus siglas en inglés), la simbología usada en este tipo de diagrama hace parte de los estándares ISA-5.1 e ISA-5.3, desarrollados por la Sociedad Internacional de Automatización o ISA (por sus siglas en inglés), permite diferenciar las variables medidas, las funciones de la instrumentación, el tipo de señales y con ello las características de control apropiadas al proceso.

Como se aprecia en la *ilustración 14*, un instrumento hardware, llámese, sensor, válvula, motor, entre otros, puede ser descrito mediante un círculo y mediante definiciones de letras empleadas en la identificación funcional del instrumento, es posible establecer un “número TAG” del instrumento una explicación de su nomenclatura se puede apreciar en la tabla 3. Específicamente los instrumentos usados en el sistema de olfato electrónico son los indicados en la tabla 4.

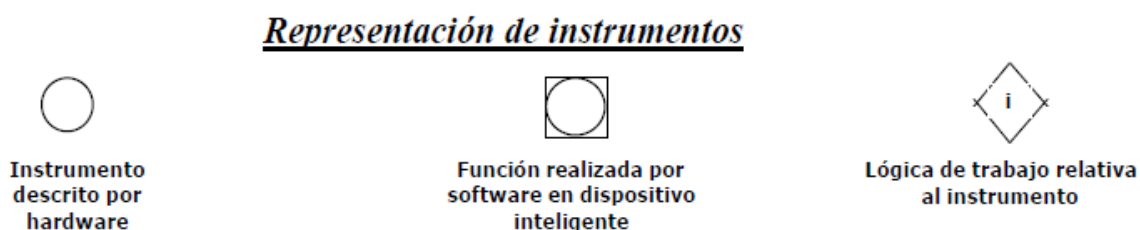


Ilustración 14 representación de instrumentación [26]

| Numero TAG | |
|------------|---|
| TIC 103 | Identificación del instrumento o Numero TAG |
| T | Primer letra relacionada a la variable |
| IC | Relacionadas a la función del instrumento |
| 103 | lazo |
| TIC | Identificación Funcional |
| T 103 | Identificación lazo |

Tabla 4 Numero TAG. [26]

| Identificación del instrumento-Numero TAG | Descripción |
|---|--------------------------------------|
| FZ 01 | Generador de flujo lazo 1 |
| FY 01 | Conmutador Válvula de Flujo lazo 1 |
| FV 01 | Válvula de Flujo lazo 1 |
| FC 01 | Elemento controlador de Flujo lazo 1 |
| FE 01 | Sensor de flujo lazo 1 |
| ME 02 | Sensor de Humedad lazo 2 |
| TE 02 | Sensor de Temperatura Lazo 2 |

Tabla 5 TAG's empleadas en sistema de olfato electrónico

Luego se tiene el diagrama P&ID indicado en la *ilustración 15*, que describe como el sistema de entrega de muestra en el lazo uno, permite la detección y control de flujo (F), cuenta con dos generadores de flujo (FZ) los cuales ingresan flujo a las cámaras, en la salida se tienen dos electroválvulas 3/2 (*tres vías, dos posiciones*) que permiten direccionar la salida del flujo desde y hacia las cámaras a través de los conmutadores eléctricos (FY). Además, un elemento sensor de flujo (FE) y un elemento de control que permite regular la potencia suministrada a los generadores y controlar la conmutación del estado de las válvulas. El lazo dos envía información de temperatura y humedad de la cámara de detección, estas variables no son controladas en este sistema.

Se ha demostrado en reportes de la literatura, que con variaciones de flujo varían también las respuestas de los sensores [27], por ello la importancia de implementar el control del mismo, este control se lleva a cabo a través de un modelado empírico del proceso suponiendo que este es un sistema lineal e invariante en el tiempo, luego a través de datos recolectados de las medidas del sensor de flujo, frente a cambios de los generadores de flujo, se puede construir un modelo adecuado y un controlador que luego se implementó en la tarjeta de prototipado electrónico ARDUINO, los elementos del sistema están ubicados como se indica en la *ilustración 15*, los cambios en los generadores de flujo responden a modulaciones de ancho de pulso (PWM) controlados en este caso a través del microcontrolador ATmega328P en la tarjeta Arduino y detectados con el elemento sensor, estas son las entradas del sistema, la salida corresponde al flujo.

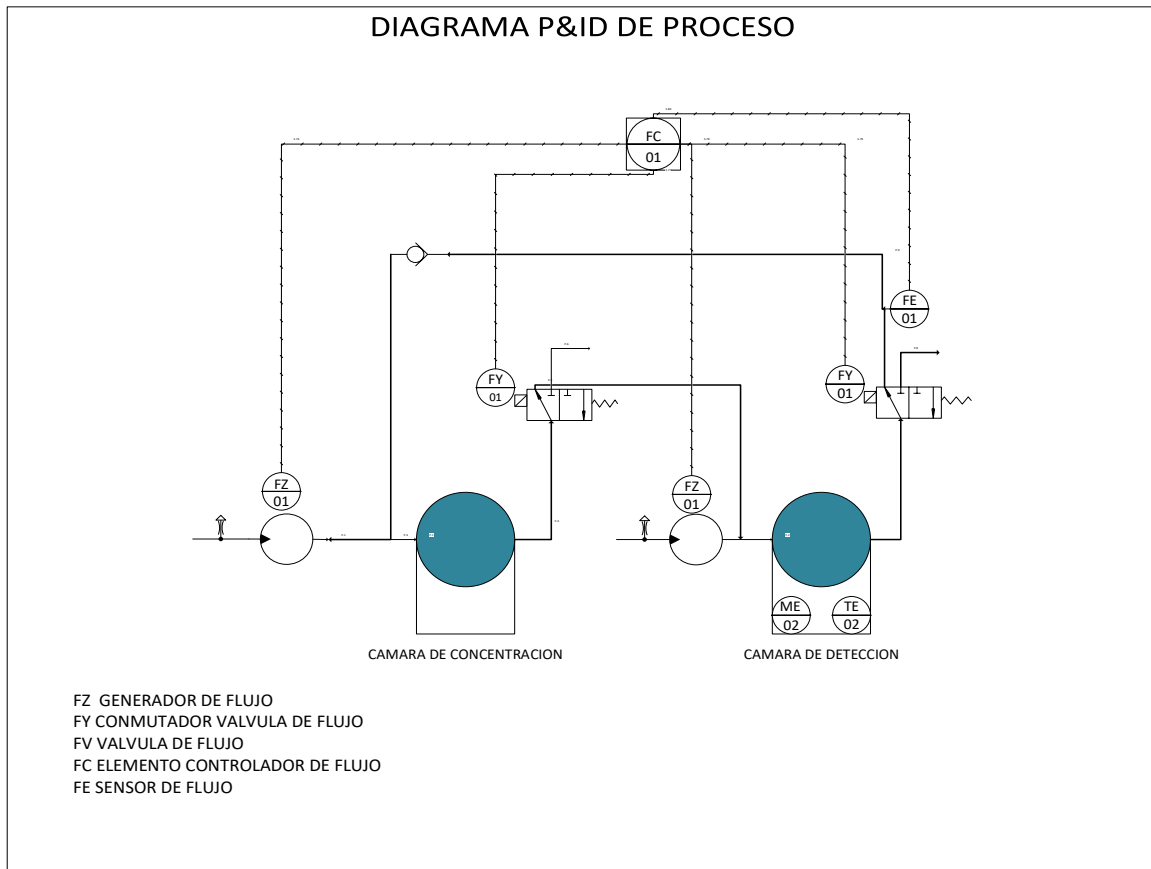


Ilustración 15- Diagrama P&ID

A través del experimento realizado se obtiene la siguiente estimación de modelo en el espacio de estados.

```

%-----
Data = load ('dataflu1s.mat');
s = tf('s');
T = Data.T;
U1 = Data.U1;
U2 = Data.U2;
Y1 = Data.Y1;
% Y2 = Data.Y2;
IdData = iddata([Y1],[U1 , U2],1000E-3);
Model = n4sid(IdData,3);
compare(IdData,Model)
%-----
G = tf(ss(Model.A,Model.B,Model.C,Model.D,1000E-3))

G =

From input 1 to output:
0.0004137 z^2 + 0.004323 z - 0.004116
-----
z^3 - 2.02 z^2 + 1.399 z - 0.3693

```

From input 2 to output:

$$\frac{0.002299 z^2 + 0.002454 z - 0.004078}{z^3 - 2.02 z^2 + 1.399 z - 0.3693}$$

Sample time: 1 seconds
Discrete-time transfer function.

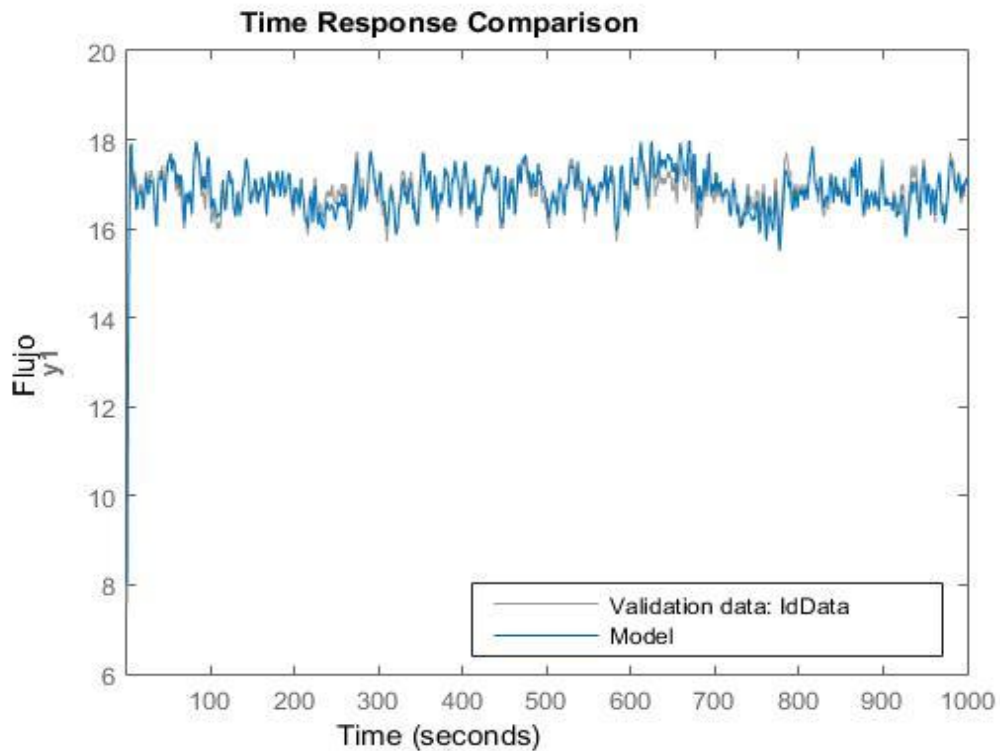


Ilustración 16. Comparativa datos vs Modelo flujo

Así mismo una respuesta del sistema, donde se comparan los datos y el modelo del flujo, como se observa en la ilustración 16. Controlar el flujo del sistema constituye uno de los puntos de partida, OFF SET.

Además, se consideró muy importante dejar como evidencia un listado de los materiales utilizados para implementar el sistema de nariz electrónico, a fin de establecer las condiciones iniciales de trabajo, con los que cuenta el dispositivo y definir su alcance, reflejado en los elementos usados y sus parámetros. A continuación se listan esos elementos, con sus respectivos detalles.



Sensor de flujo YF-S401

Sensor de efecto hall

voltaje de trabajo 5 a 24 V dc

rango de medida 0.5 a 10 L/min

Temperatura Op <= 80 grados

diámetro interno 1.2 mm

presión <=1.75MPa



Válvula de control.

Voltaje de funcionamiento 5vdc

tipo 3/2 tres vías dos posiciones.

corriente 200mA

Rango de presión: 0-350 mmhg.

Diámetro 1/8''



Generador de flujo

Voltaje 12vdc

Rata de flujo 1-20lt/min

Corriente nominal <400mA

Ruido 65dB.



Racor rápido

Permite acople de sistemas neumáticos garantizando la junta.

Diámetro 1/4 ''



Manguera flexible de poliuretano

Presión de funcionamiento -0.95-10 bar.

Alta resistencia a fisuras mecánicas.

Diámetros 1/16''- 5/8''



Arduino Uno

Procesador ATmega328P

Serial: 0 (RX) and 1 (TX).

Interrupciones Externas: pin 2 y 3.

PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11. Provee 8-bit PWM output



Ilustración 17. Componentes del Sistema de olfato Implementado

Finalmente se establece un sistema llamado sistema de olfato de café, como se observa en la *ilustración 17*, con las características básicas de control de flujo, volumen de concentración de la muestra y sistema de medición, flujo y limpieza.

Por otra parte, se establece una tabla de costos que permite definir estrategias de mejora del sistema base, a partir de la construcción o adecuación de cada uno de los sistemas anteriormente descritos, y tener en cuenta la viabilidad en función de la inversión.

| TABLA DE COSTOS | |
|---|------------------|
| Elemento | Costo COP |
| Fuente de poder | 35.000 |
| Cámaras (peceras) | 30.000 |
| Acople rápido (racor)*6 | 14.700 |
| MQ 4 | 15.000 |
| MQ 6 | 20.000 |
| MQ 135 | 15.000 |
| MQ 135a | 15.000 |
| MQ 8 | 12.000 |
| Componentes Eléctricos Etapas de Potencia | 30.000 |

| | |
|----------------------------|----------------|
| Electroválvulas | 50.000 |
| Sensor de flujo | 12.000 |
| Manguera neumática | 15.000 |
| Silicona | 10.000 |
| Torneado Tapas de Aluminio | 180.000 |
| Arduino Mega2560 | 50.000 |
| Arduino UNO | 20.000 |
| total | 523.700 |

Tabla 6 Tabla de costo del sistema base

Finalmente, se procedió a estructurar adecuadamente el código de programación, donde se modeló el sistema a partir de la teoría de sistemas a eventos discretos denotados con el acrónimo DES, esta nos permite modelar el sistema a partir de sus “estados” y los eventos que dirigen las transiciones de un estado a otro en el proceso. El espacio de los estados es un conjunto discreto, es decir se da a intervalos específicos en el tiempo y no de manera continua, dicho específicamente: “la evolución de los estados depende de eventos discretos que ocurren de manera asíncrona en el tiempo” [28]. Existen tres niveles de abstracción para el estudio de los DES basados en el concepto de un lenguaje definido a partir del conjunto de eventos posibles del sistema. para el caso del SOE donde el objetivo es describir el comportamiento lógico del sistema de tal manera que sea posible especificar un orden de eventos requerido, para esto se lo modela como un autómata.

Teniendo en cuenta que, “Un autómata finito es un modelo matemático que permite saber si una cadena de símbolos pertenece o no a un lenguaje definido por los eventos del sistema”, se especificaron los siguientes procedimientos:

1. Dividir el sistema en unidades de acuerdo a su funcionamiento:
 - Generador de flujo cámara de concentración FZC.
 - Generador de flujo cámara de detección o FZD
 - Válvulas o V1 y V2.
 - Sensor de Flujo.

2. Identificar los estados de cada componente.
 - Generador FZC y FZD: reposo, aumentando flujo, disminuyendo flujo.
 - V1 posicion1: enviando a detección; Posición2: enviando a exterior.
 - V2 posicion1: enviando a sensor flujo; Posicion2: enviando a exterior.
 - Sensor de flujo: detectando, no detectando.

3. Definir los eventos que rigen el comportamiento del sistema y clasificarlos como controlables o no controlables.

Descripción de funcionamiento:

- 3.1. El proceso sistema una vez encendido inicia en una *condición de reposo*, en donde la potencia a la matriz de sensores es la adecuada para que este alcance su condición optima de detección. FZC y FZD, así como V1 y V2 también se encuentran en estado de reposo.
- 3.2. Cuando se quiera tomar una muestra el usuario a través de puerto serial da la señal que le indica al sistema que la muestra se encuentra en la cámara de concentración y que esta se encuentra debidamente sellada, con dicha se da inicio a la *etapa de concentración* durante la cual paralelamente los sensores mantienen su estado óptimo de detección.
- 3.3. Una vez alcanzado el tiempo de concentración, inicia la *etapa de detección* FZD genera flujo de aire dentro de la cámara de detección y V2 en su posición 1 permite registrar dicho flujo esto con el fin de que alcance su estado estable en el “set point” indicado, pasados 30 segundos FZC genera el flujo para transportar el espacio de cabeza hacia la cámara de detección y V1 se conmuta a la posición 1 “enviando hacia cámara de detección”, esto nuevamente durante 30 segundos, FZD y FZC a través del controlador encuentran la relación adecuada para que el flujo permanezca constante, de esta manera se conmuta cada 30 segundos entre flujo de aire y flujo de muestra, hasta completar la cantidad de datos especificada completando el ciclo de detección.

3.4. Luego inicia una *etapa de limpieza* donde FZD permite fluir aire en la cámara de detección luego de lo cual el sistema permanece en “stand by” o reposo, conservando el estado óptimo de detección de la matriz de sensores, en este estado el usuario puede posicionar una nueva muestra o apagar el sistema.

4. Modelar cada parte como un autómata.

Se hace uso del software Supremica una herramienta para la verificación y síntesis formal de sistemas a eventos discretos, se basa en la teoría de control supervisorio originalmente formulada por Ramadge And Wonham, tiene como marco de referencia los autómatas finitos [27].

Se establecieron los estados y los eventos entre estados para el proceso, ilustración 18, entre los eventos se da una señal de inicio, y el cumplimiento de los tiempos de concentración, ciclos de limpieza y detección, los estados se encuentran en cada nodo.

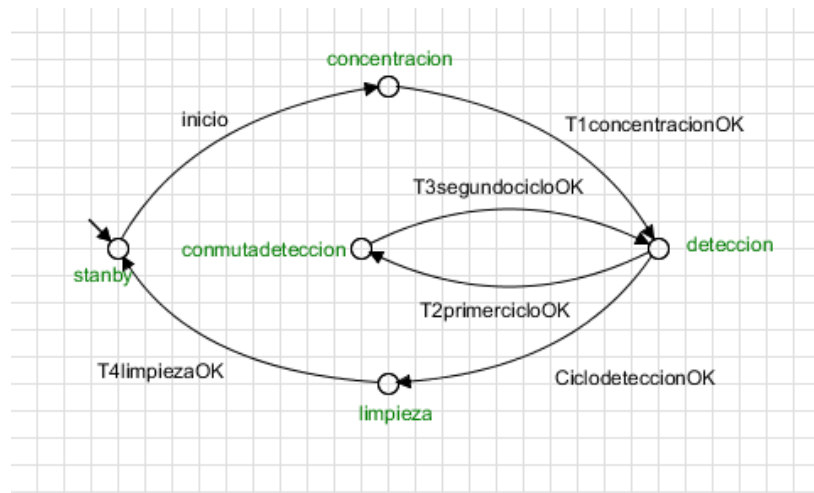


Ilustración 18. Autómata del Proceso

Los autómatas indicados en las ilustraciones 19 y 20 explican el funcionamiento de los generadores de flujo, los cuales pasan de estar apagados a estar generando flujo, mientras se mantiene este estado, puede variar entre generar más o menos flujo, dependiendo de lo que

resulte de la ley de control de flujo, y deja de generar o se apaga cuando los eventos indiquen que los tiempos del proceso se han ido cumpliendo.

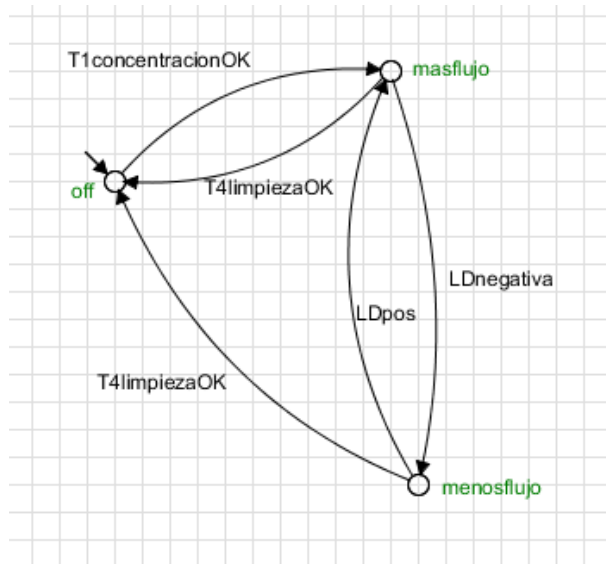


Ilustración 19. Autómata FID

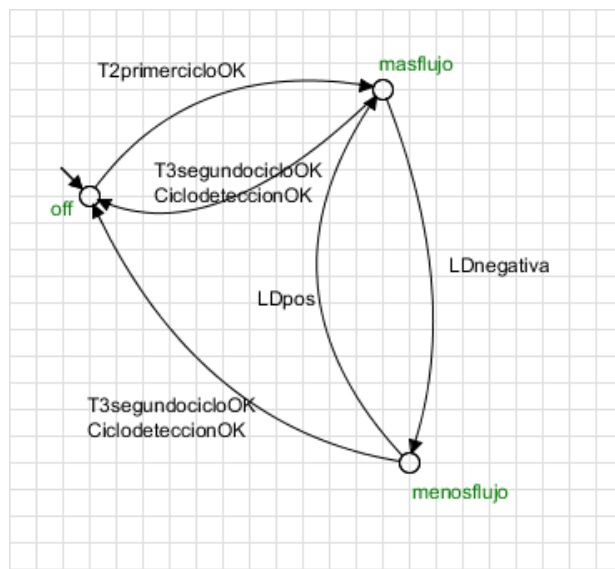


Ilustración 20. Autómata FYC

Los autómatas en las ilustraciones 21 y 22 representan las válvulas 3/2 (tres vías dos posiciones), las posiciones corresponden al estado “enviando a exterior” o “enviando a cámara de detección” para la válvula 1 y “enviando a exterior” o “enviando a sensor de flujo” en la válvula 2.

Los eventos para conmutar estados se cumplen con temporizador implementado digitalmente a través de interrupciones, así a través del conjunto de los eventos se logra la sincronía determinada.

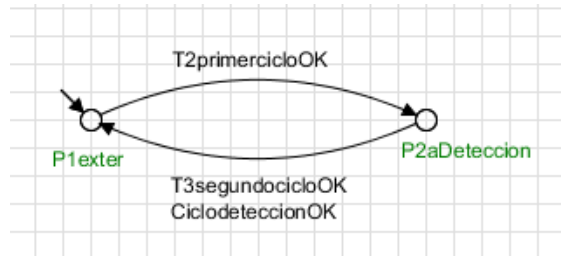


Ilustración 21 Autómata V1

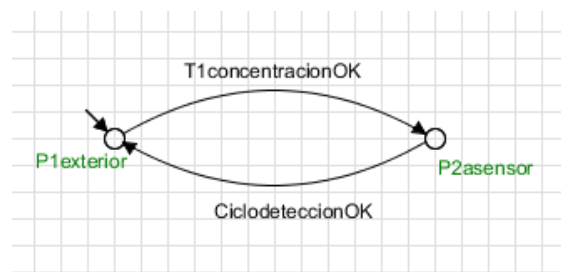


Ilustración 22. Autómata V2

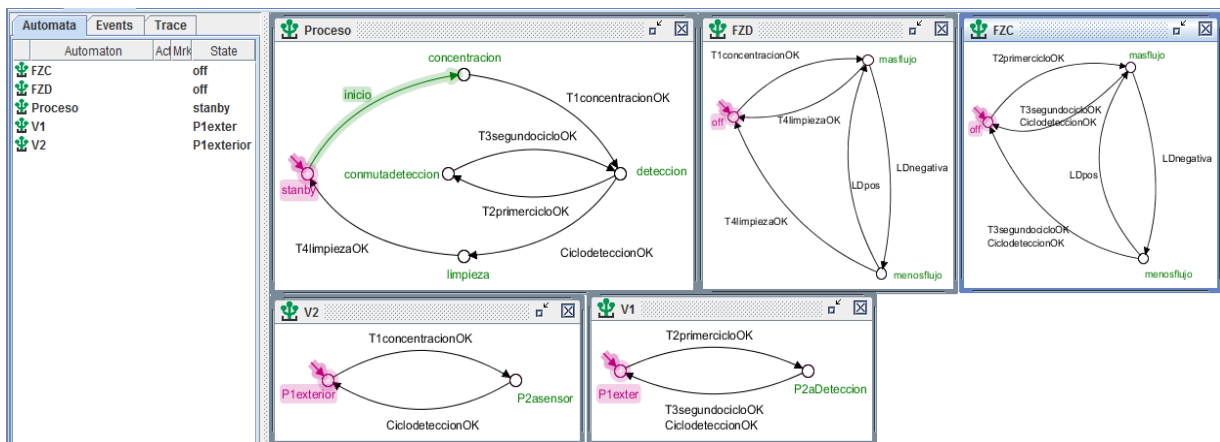


Ilustración 23. Simulación interacciones Autómatas.

El software Supremica permite realizar una simulación del proceso una vez realizado este modelado el programa puede estructurarse como en el ejemplo a continuación.

```

switch(STATUS)
{
case 0: //--- "Ready"
    if(Event == 3) { STATUS = 3; } //«>>>» button pressed
    if(Event == 6) { STATUS = 1; } //Audio file not found
    if(Event == 1) { STATUS = 2; } //«PLAY» button pressed

    z1(); // Set the indicator to the initial state
    break;

case 1: //--- "No Track"
    z6(); // Give the «No Track» message
    break;

case 2: //--- "Playing"
    if(Event == 4) { STATUS = 4; } //«<<<» button pressed
    if(Event == 5) { STATUS = 5; } //«PAUSE»( | | ) button pressed
    if(Event == 3) { STATUS = 3; } //«>>>» button pressed
    if(Event == 2) { STATUS = 0; } //«STOP» button pressed
    z2(); // Playing
    break;

case 3: //--- "Fast-Forward"
    z3(); // Next track
    { STATUS=2; }
    break;

case 4: //--- "Rewind"
    z4(); // Previous track

```

```

{ STATUS=2; }

break;

case 5: --- "Pause"

if(Event == 5) { STATUS = 2; } //«PAUSE» button pressed
if(Event == 1) { STATUS = 2; } //«PLAY» button pressed
if(Event == 2) { STATUS = 0; } //«STOP» button pressed
if(Event == 3) { STATUS = 3; } //«>>>» button pressed
if(Event == 4) { STATUS = 4; } //«<<<» button pressed

z5(); //Pause

break;
}

```

Ilustración 24. Programa estructurado a partir de supremica

2.4.3 Circuito Eléctrico.

Haciendo uso del software para diseño electrónico PROTEUS se desarrollan las etapas de potencia para motores y válvulas a partir de los consumos de las cargas, se implementa modulación por ancho de pulso con el MOSFET IRFZ44N y circuito de polarización 2N3904 para los generadores cuya corriente nominal es menor a los 400mA, y un circuito de polarización a 5V DC para las electroválvulas de comportamiento binario.

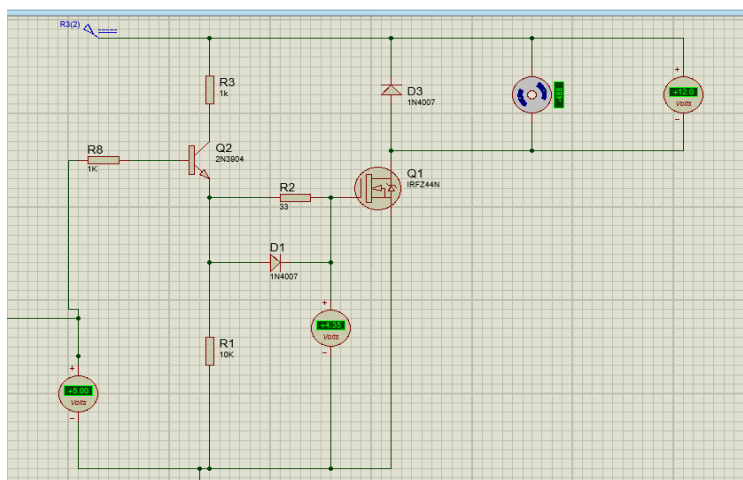


Ilustración 25. circuito eléctrico etapa de Potencia

2.4.4 Matriz de Sensores.

Es la parte vital del sistema, se utiliza un arreglo de sensores de gas de la familia de sensores MQ que junto con el sistema de entrega de muestra son parte de un sistema dinámico, el tiempo en alcanzar el estado estable depende de parámetros como la rata de flujo, volumen de la cámara de detección rata de difusión y reacción.

Si el sensor es modelado usando sus valores en estado estable el tiempo de calibración puede ser mayor el cual es el tiempo necesario para conocer la señal de respuesta del sensor, de la calibración se pueden dilucidar sensibilidad y selectividad parcial.

El perfil de concentración del vapor puede influir en la forma de onda de la respuesta del sensor y ancho de pulso del vapor debe ser lo suficientemente menor al tiempo de respuesta/recuperación del sensor. En este sistema se busca mantener un flujo constante durante la etapa de detección y esta también es información útil como entrada al proceso de reconocimiento de patrones que se use. Así se hace necesario un método de identificación de esta dinámica, para empezar en la tabla 3 se consignan algunas características relevantes de los sensores utilizados.

Los sensores de gases son dispositivos con alta inercia, es decir, la respuesta necesita tiempos largos para estabilizarse tras un cambio de concentración de los gases medidos. Ello es debido a la necesidad física de que el gas abandone el material sensible, lo cual es un proceso lento. todos los modelos MQ tienen tecnología MOS, MOS significa Metal Oxide Semiconductor, lo que indica que usa un material semiconductor que es un óxido de un metal. Disponen de un calentador necesario para elevar la temperatura del sensor, y que sus materiales adquieran la sensibilidad adecuada. Mientras el calentador no alcance la temperatura de funcionamiento, la lectura del sensor no será fiable[17].

El principio de operación está basado en el cambio de la conductancia a partir de la interacción del gas con el óxido, la cual es usualmente proporcional a la concentración del gas, los sensores pueden ser sensibles a gases reductores u oxidantes, la sensibilidad de este tipo de sensores $(\Delta R/R_b)/C(\text{gas})$ se calcula con $\Delta R = R - R_b$, donde R_b es la línea base de la resistencia, R es la resistencia detectada en presencia del gas y $C(\text{gas})$, la concentración del gas.

En la Ilustración 26 se indica la configuración de pines de la serie MQ, la cual permite tanto la alimentación a la resistencia calefactora como también medir la resistencia en la capa activa del sensor, como se puede observar se utiliza el principio de un divisor de tensión donde se tiene

que $R = \frac{V_c * R_L}{V_{RL}} - R_L$ donde:

- R = Resistencia medida del sensor
- V_c = tensión de referencia 5V
- V_{RL} = Tensión de salida o en resistencia de carga, valor adquirido
- R_L = Resistencia de carga

Tabla 7. Sensores de gas empleados

| SENSOR | GAS | Vc | Rs | SDC |
|--------|--|--------|---------------------------|-----------------------|
| MQ-135 | NH3, NOx, alcohol, benceno, humo, CO2, ... | 5V±0,1 | 30KΩ -200KΩ 100ppm NH3 | Temp : 20 Hum: 65% |
| MQ-04 | CH4-Gas natural | 5V±0,1 | 10KΩ -60KΩ 1000ppm CH4 | Temp : 20 Hum: 65% |

| | | | | |
|-------|-------------------------------|--------|---------------------------|-----------------------|
| MQ-06 | LPG, iso-butano, propano, LNG | 5V±0,1 | 10KΩ -60KΩ 1000ppm LPG | Temp : 20 Hum: 65% |
| MQ-08 | Hidrogeno | 5V±0,1 | 10KΩ -60KΩ 1000ppm H2 | Temp : 20 Hum: 65% |

Esta parte del dispositivo fue desarrollada teniendo en cuenta varios sensores de gas que detectan los compuestos volátiles, en este caso es una matriz de 5 sensores de gas de óxido de metal fabricados por Winsen-sensor (sensores MQ135a(sin instrumentación), MQ-135, MQ-04, MQ-06 y MQ-08). Los sensores de gas se usan ampliamente para ensamblar matrices para la medición de olores. El gas se detecta por su efecto sobre la resistencia eléctrica del semiconductor de dióxido de estaño (SnO_2), como resultado de los cambios en la conductividad provocados por las reacciones de combustión que se producen con especies de oxígeno en la superficie de las partículas de dióxido de estaño [4]. La Tabla 7 muestra los sensores de gas utilizados; Se eligieron estos tipos de sensores debido a su alta sensibilidad a gases orgánicos, naturales, contaminantes y combustibles.

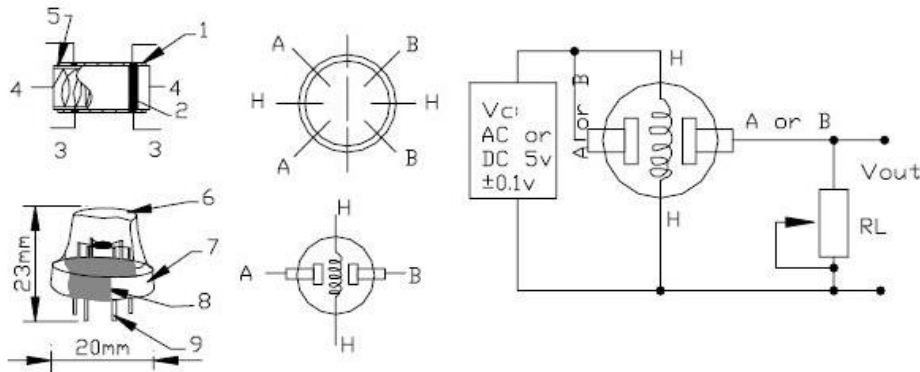


Ilustración 26. Configuración típica sensores de gas MQ de hoja de datos

La respuesta transitoria de los sensores, *ilustración 27*, permite apreciar el cambio en la conductancia con el transcurrir del tiempo una vez el sistema es energizado, se concluye que el tiempo en alcanzar el estado estable es de 15 segundos, dicha información fue de utilidad para generar el pulso de excitación en la etapa de detección y limpieza y establecer un punto de partida OFF SET.

De igual manera los datos obtenidos del estado estable de la matriz de sensores, ilustración 28, fueron útiles a la hora de analizar los datos de olor, teniendo en cuenta que se incluyó una etapa de Pre-procesamiento de la señal, y extracción de características, como la línea base de la matriz. Ambos experimentos se realizaron sin influencia de flujo de aire y en cámara hermética, la frecuencia de muestreo de los datos es de 250ms.

Los sensores seleccionados, de acuerdo a la alta sensibilidad a gases orgánicos, naturales, contaminantes y combustibles, generalmente presentes en el proceso de tostado del café, fueron expuestos a esencias conocidas, a fin de representar la fragancia y el aroma del café (esencia de banano para fragancia y esencia de café para aroma) y que permitieron generar una lectura de las mayores intensidades percibidas, como se expondrá en la sección 3.

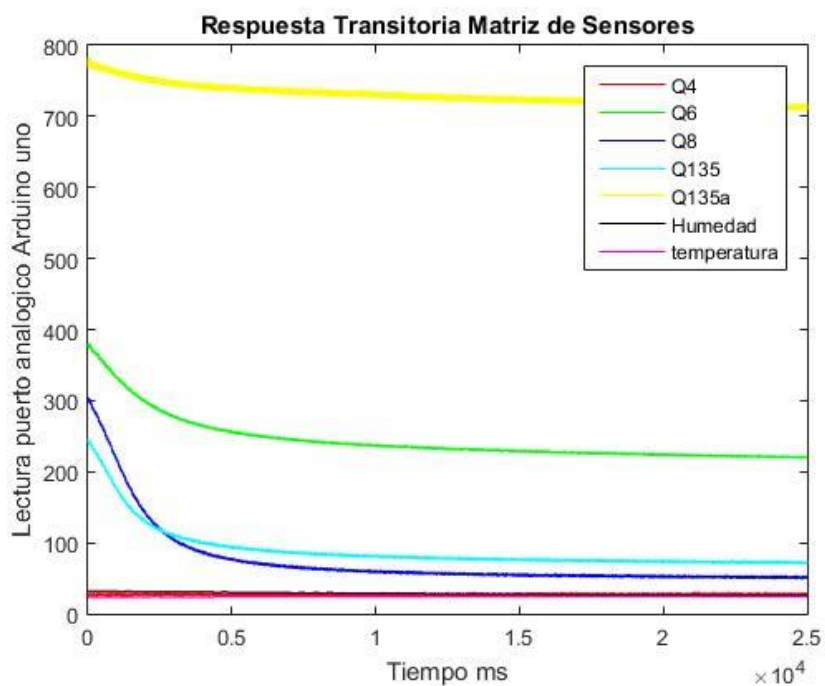


Ilustración 27. Respuesta Transitoria del sistema

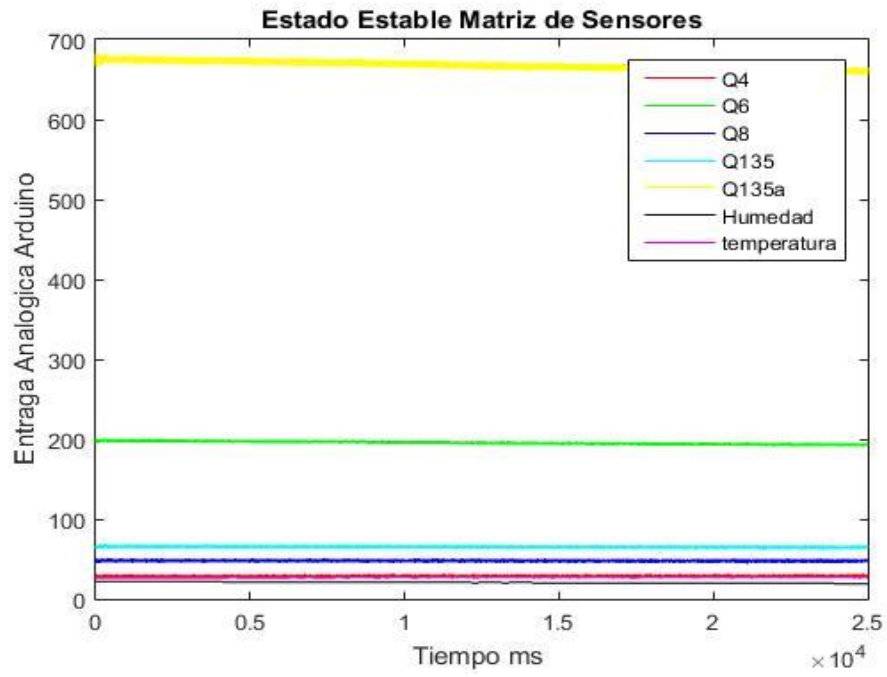


Ilustración 28. Respuesta estado estable

3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

3.1. Correlaciones VOC con fragancia y aroma del café

Para las pruebas de correlación se realizaron experimentos que ayudaron a obtener diferentes volúmenes de café en diferentes escalas de tuestión, de acuerdo a la curva de la *ilustración 29*. Los grados de tueste hacen referencia a los 8 niveles de tostado establecidos por la sociedad americana de cafés especiales SCAA, relacionados a los segmentos de tueste de café; claro (1,2), medio (3,4) y oscuros (6,7,8). Con estas muestras se realizó un proceso de exclusión, que consistió en retirar el café con muy poco grado de tostado, menos tostado (1) y el que tenía mayor tiempo de tostado o quemado (8). Posteriormente, se incluyeron las 6 muestras restantes y se seleccionaron los niveles 2, 4 y 6, definidos como Light, Medium y Dark respectivamente. En este punto fue necesario establecer el procedimiento para variar el volumen de la muestra, donde se duplicó y triplicó para obtener 9 muestras de concentración para cada nivel de tostado.

MUESTRAS DE CAFÉ



Ilustración 29. Grados de Tostion del café

Teniendo en cuenta como condición inicial, OFF SET, la presencia de aire en la cámara de medición del sistema de olfato electrónico, se puede partir de la respuesta del sistema en estado estable y en estado transitorio de la matriz de sensores, para detectar las correlaciones de aroma y fragancia de estos dos componentes significativos.

Inicialmente se tomó la esencia de banano (Acetato de isoamilo) que es tomada en este trabajo como la representación de la FRAGANCIA del café (café tostado y molido en estado seco) por su frescura, sensación aromática, caramelo y dulce. La esencia de banano es un éster del alcohol isoamílico y el ácido acético, que si se observa en la ilustración 5, correspondería al grupo ESTERES (frutal, dulce, grasa, rancio, irritante y floral en el café). Un punto a favor de este componente, es su poder irritante para la nariz, y el cual está cuantificado de acuerdo a la escala de 6-10 de la SCAA como 10, es decir un Olor potente, POTENT ODORANT [30], componente importante y significativo para la fragancia del café. Además, es un compuesto químico de grado alimenticio, sintetizado en laboratorio, nombre IUPAC, 3-metil-1-butil acetato, obtenido de la fábrica de insumos QUIMPO LTDA, que garantiza su estabilidad.

Se realizó el experimento contemplando tiempo de muestreo 250 ms y volúmenes de esencia de 30 y 60 cc, para cuantificar la respuesta de cada sensor. Los resultados de estos ensayos se muestran en la ilustración 30. Para estas gráficas, el eje Y representa el voltaje del sensor, en (mV) y en el eje X el tiempo en segundos (s).

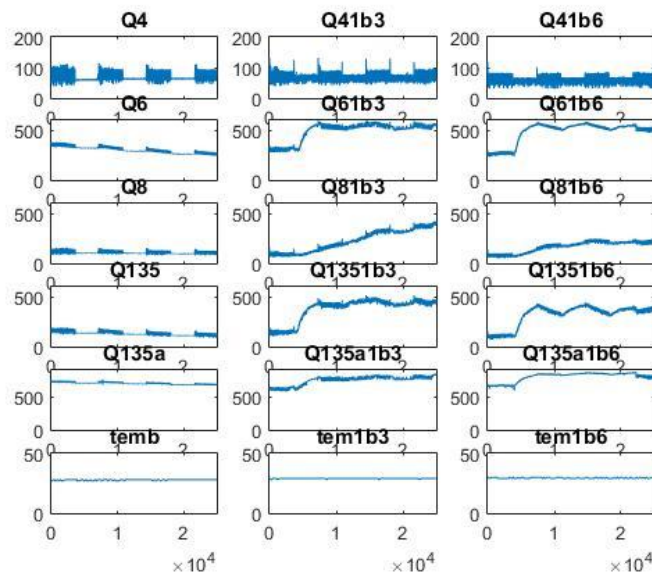


Ilustración 30. Respuesta de la matriz de sensores con esencia de banano- diferentes volúmenes

La primera columna de la ilustración 30, presenta el comportamiento de los sensores, en el proceso de inicio de la medición (flujo sin concentrar aire/esencia-OFF SET). En la columna 2

y columna 3 de la ilustración 30, se puede observar la respuesta de los sensores ante el cambio de volumen de la muestra 30 cc y 60 cc respectivamente. Se observa una saturación esperada, en la respuesta de los sensores MQ6, MQ8 y MQ135 ante la presencia del compuesto del acetato de isoamilo (esencia de banano), dadas sus propiedades químicas particulares y su alta volatilización e intensidad característica. Los resultados que relacionan la intensidad percibida por los sensores para cada volumen de concentración de la muestra, se observa en la tabla 8.

| Sensor | Pico de Respuesta (mV) | | Señal percibida |
|--------|------------------------|--------------|-----------------|
| | 30 cc esencia | 60cc esencia | |
| MQ4 | 110 | 100 | Impulso |
| MQ6 | 520 | 539 | Escalón |
| MQ8 | 300 | 210 | Rampa |
| MQ135 | 500 | 480 | Escalón |
| MQ135a | 670 | 700 | Escalón |

Tabla 8. Resultados de concentración de esencia de banano (acetato de isoamilo).

Estos datos caracterizaron el sistema y cuantificaron la medida de la fragancia, tanto para un volumen de 30 cc como para 60 cc de muestra de la esencia de banano, en la cámara de medición. Este comportamiento propone que cada sensor tiene un aporte individual a la señal percibida, y que la matriz de sensores se comportará en estos niveles máximos y mínimos para el componente de la fragancia.

Por otra parte, se realizó el mismo experimento anteriormente descrito, pero esta vez contemplando el uso de una esencia de café, del fabricante QUIMPO Ltda, Grado alimenticio, con tiempo de muestreo 250 ms, para caracterizar el aroma del café (bebida de café).

Los resultados de estos ensayos se muestran en la ilustración 31. Para estas gráficas, el eje Y representa el voltaje del sensor, en (mV) y en el eje X el tiempo en segundos (s).

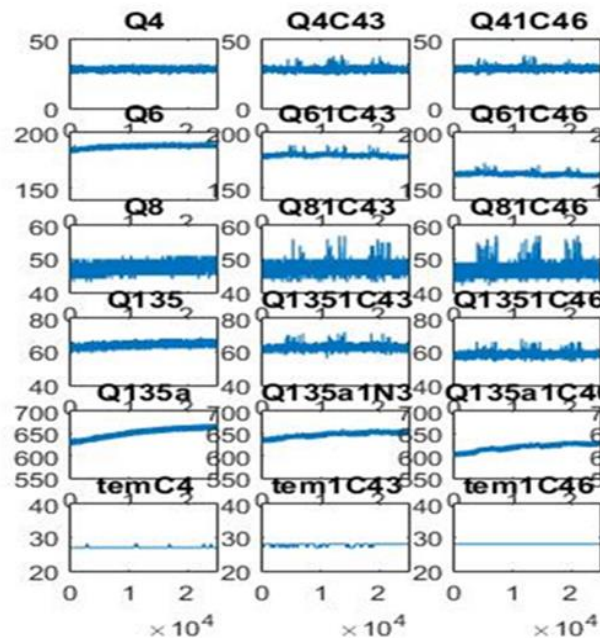


Ilustración 31. Respuesta de la matriz de sensores con esencia de café- diferentes volúmenes

La primera columna de la ilustración 31, representa el comportamiento de los sensores, en el proceso de inicio de la medición (flujo sin concentrar aire/esencia café-OFF SET). Particularmente se observa un engrosamiento de la línea base de todos los sensores, debido a la presencia de humedad en el sistema. A demás, la esencia de café tiene una humedad entre 90-95%, de características impregnantes (caramelo), por su uso en la industria alimenticia.

En la columna 2 y columna 3 de la ilustración 31, se obtuvo la respuesta de los sensores ante el cambio de volumen de la muestra de café diluida en agua y bajo las condiciones de concentración en aire de 30 cc y 60 cc.

Particularmente la esencia de café no presenta características de volatilización rápida, en comparación con la esencia de banano, lo que demandó más tiempo de medición y más pruebas, sin embargo se puede apreciar una respuesta aceptable por parte de los sensores MQ4 Y MQ8 Y MQ135, por su parte los sensores MQ6 Y MQ135a (sin circuito de acondicionamiento de señal), contribuyeron adecuadamente a cuantificar los valores máximos del sistema de matriz de medición.

Los resultados que relacionan la intensidad percibida por los sensores para cada volumen de concentración de la muestra, se observa en la tabla 9.

| Sensor | Pico de Respuesta (mV) | | Señal Percibida |
|--------|------------------------|--------------|-----------------|
| | 30 cc esencia | 60cc esencia | |
| MQ4 | 25 | 25 | Impulso |
| MQ6 | 180 | 160 | Impulso |
| MQ8 | 59 | 59 | Impulso |
| MQ135 | 70 | 70 | Impulso |
| MQ135a | 650 | 640 | Rampa |

Tabla 9. Resultados de concentración de esencia de café.

Estos datos caracterizaron el sistema y cuantificaron la medida del aroma, tanto para un volumen de 30 cc como para 60 cc de muestra de la esencia de café, en la cámara de medición.

Debido a las condiciones de baja volatilización de la muestra de esencia de café, se propuso aumentar la concentración a 90 cc, como alternativa para conocer si existiría alguna variación respecto a las medidas con concentraciones de 30 y 60cc. El resultado no fue diferente al ya mostrado en la tabla 9, lo que se puede atribuir a que la temperatura de la muestra debería estar entre 70-90 °C, simulando una bebida de café preparado, cuya temperatura oscila en ese rango. De forma sistemática se incluye la variable de concentración a 90 cc, para completar el experimento a 3 y por triplicado.

3.2. Tratamiento de datos

En primera medida se realiza un análisis de la varianza de un factor, que permite contrastar base la descomposición de la variación total de los datos con respecto a la media global de tal manera que se permita interpretar “si las diferencias entre las medias de los grupos son estadísticamente significativas”, para nuestro caso que sea significativa da cuenta de la capacidad del sensor para detectar los cambios de volumen en los experimentos realizados, refutando la hipótesis nula y dando pie a una continuidad en el análisis estadístico de los datos.

Al aplicar este análisis estadístico a los datos de cada sensor se encontró que se rechaza la hipótesis nula para cada uno de los conjuntos de datos.

Finalmente, se propuso obtener patrones en estos datos, que puedan soportar la detección de fragancia y aroma del café para la muestra seleccionada. En ese sentido se propuso el análisis de componentes principales, para disminuir la dimensionalidad de los siguientes experimentos. v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 y v_6 , son las variables generalizadas (vectores) que representan la fragancia y aroma en los experimentos de cada nivel de tostado del café y son diferentes para cada sensor utilizado.

| Sensor | Fragancia 30cc | Aroma 30 cc | Fragancia 60 cc | Aroma 60 cc | Fragancia 90 cc | Aroma 90 cc |
|--------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|
| MQ4 | v_1 | v_2 | v_3 | v_4 | v_5 | v_6 |
| MQ6 | v_1 | v_2 | v_3 | v_4 | v_5 | v_6 |
| MQ8 | v_1 | v_2 | v_3 | v_4 | v_5 | v_6 |
| MQ135 | v_1 | v_2 | v_3 | v_4 | v_5 | v_6 |
| MQ135a | v_1 | v_2 | v_3 | v_4 | v_5 | v_6 |

Tabla 10. Esquema para PCA Flujo constante: 17 L/m. 250 ms muestreo

3.3. Respuesta de la matriz de sensores.

Como se ha mencionado, los datos obtenidos hasta el momento no son adecuados para para su procesamiento computacional debido a su alta dimensionalidad y redundancia, pues se sabe que los sensores poseen selectividades parcialmente solapadas, este hecho hace que sea adecuado usar técnicas de reducción de variables como lo son el Análisis de Componentes principales (PCA), su aplicación a los datos permite referenciar la clasificación del sensor frente a diferentes muestras, como se contempla en la tabla 10, el hecho de que todos los componentes principales sean ortogonales uno del otro hace que no exista información redundante, a continuación se referencian las condiciones de mayor influencia para cada sensor en la matriz.

De acuerdo a la metodología propuesta, se tomaron muestras de café tostado y molido en los niveles 2, 4 y 6, correspondientes a los niveles claro, medio y oscuro de la SCAA, y se concentró cada muestra en tres volúmenes respectivos 30,60 y 90 centímetros cúbicos, para la extracción de los patrones de medición de la matriz del sistema. El tamaño de los elementos v_1, v_2, v_3, v_4, v_5

y v6, representan la capacidad del sensor para detectar la muestra de café con su respectiva concentración.

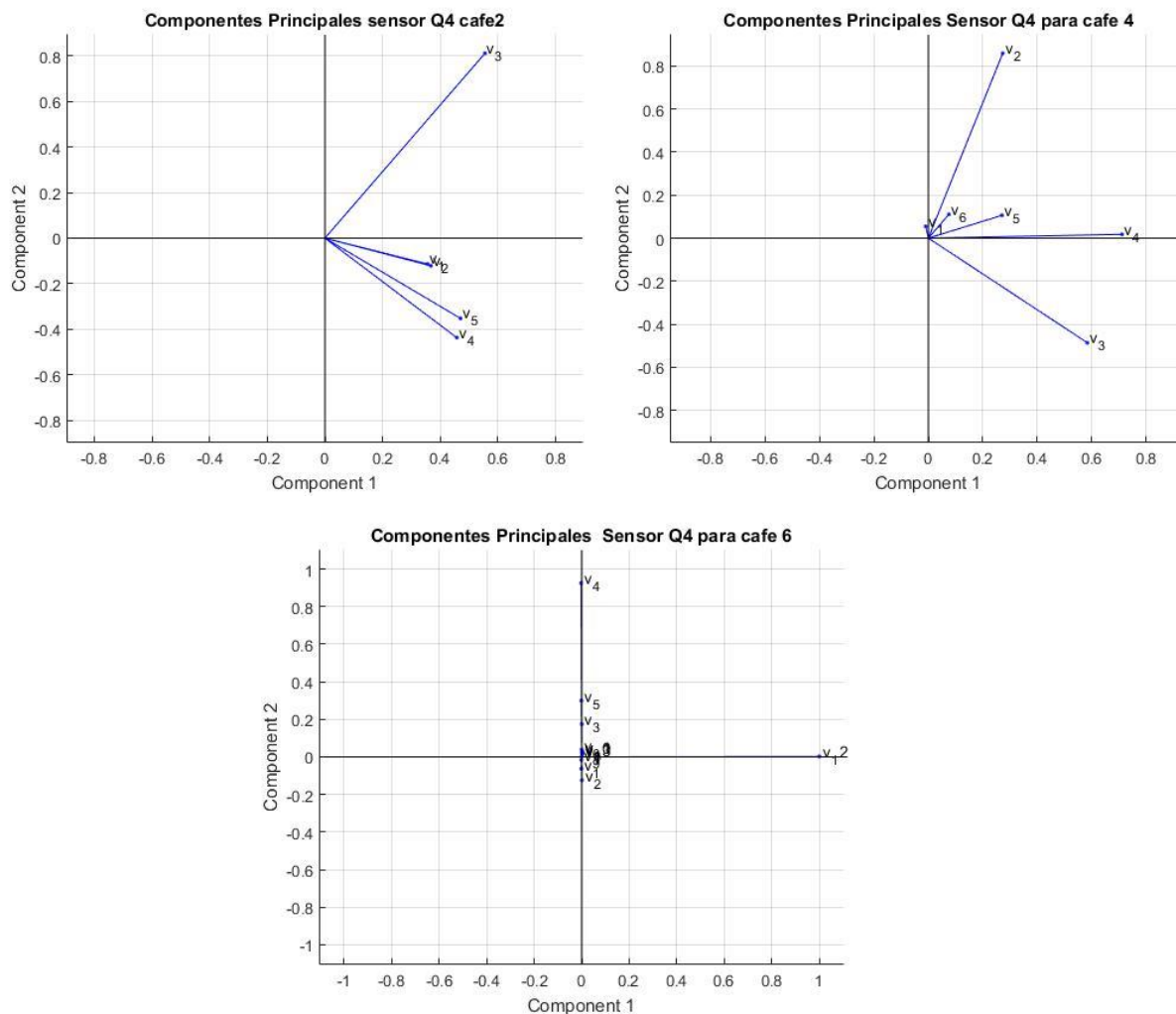


Ilustración 32. Análisis de componentes principales del sensor MQ4, con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes

Observando el PCA del sensor MQ4, se puede evidenciar que tiene una respuesta muy eficiente en detección de los componentes de las muestras de café en todos los niveles, preferenciando la detección del aroma MQ4-v4 a 60 cc (ver tabla 10), y la FRAGANCIA, con MQ4-v3 a 60 cc. (los elementos más significativos del PCA corresponden a los que tiene mayor tamaño en la gráfica del PCA, su dirección corresponde a la influencia o correspondencia con el componente 1, eje x, o al componente 2, eje Y. En caso de que un vector quede alineado en uno de los ejes

cartesianos, significa dependencia total con el componente respectivo. Por otro lado, si los vectores están en el centro, significa que las variables necesitan más de dos componentes para ser representados. En este caso se muestra la capacidad del sensor, de forma individual para realizar una detección del aroma y fragancia del café bajo las condiciones descritas en la tabla 10.

De la misma forma, se somete al sensor MQ6, al experimento de concentración de muestras de café, de acuerdo a la tabla 10. Los resultados del análisis de componentes principales de este sensor se muestran en la ilustración 33.

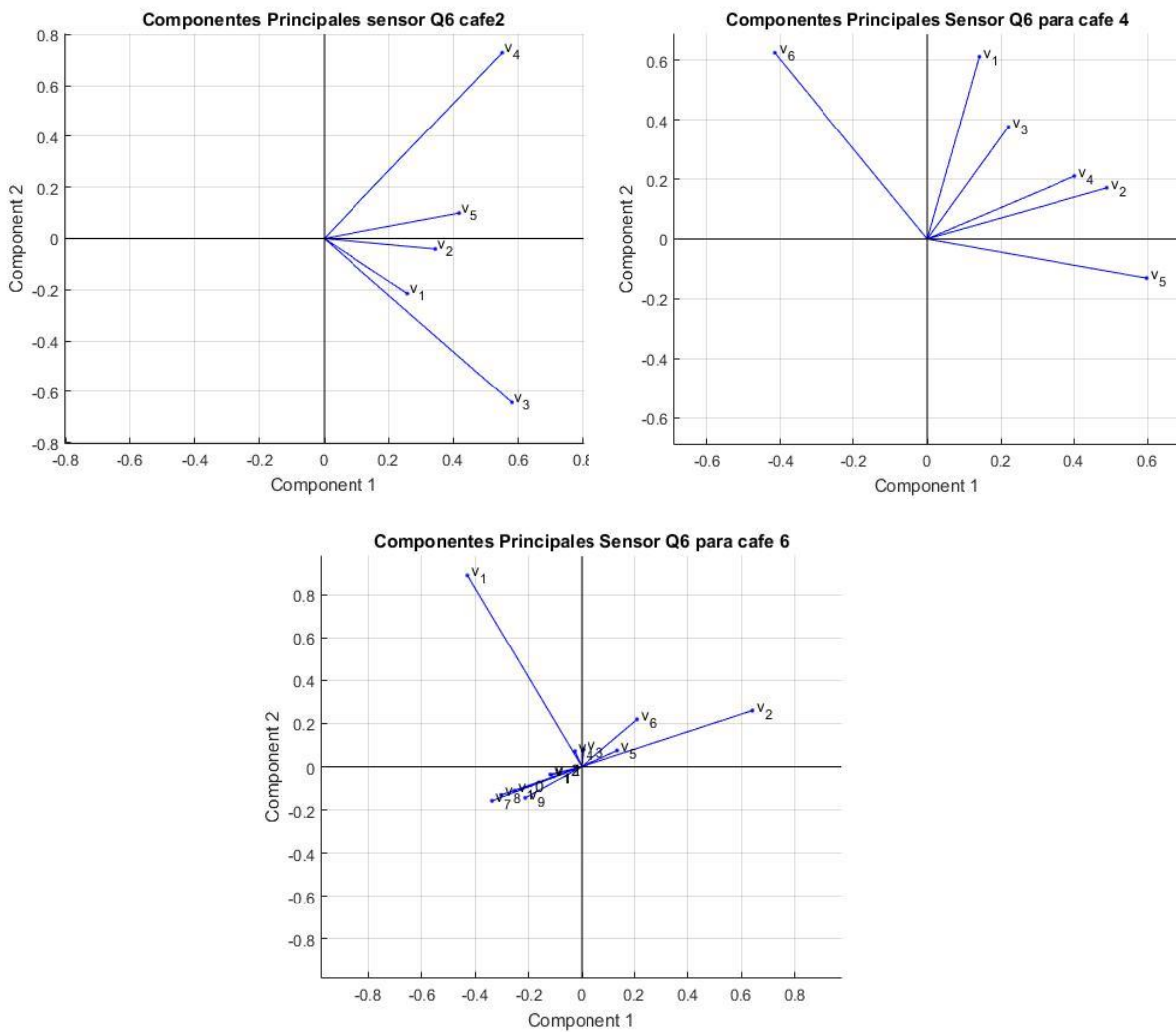


Ilustración 33. Análisis de componentes principales del sensor MQ6, con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes

De acuerdo a los gráficos de PCA del sensor MQ6, se puede observar que se obtiene una respuesta bastante discriminada para los niveles de tostado 2 y 4, referenciando MQ6-v3, MQ6-v4, para el café 2, y MQ6-v5, MQ6-v6, para el café 4. El comportamiento con la muestra de café nivel 6, preferencia el MQ6-v1 y MQ6-v2, para fragancia y aroma respectivamente. En este caso nuevamente se muestra la capacidad del sensor, de forma individual para realizar una detección de fragancia y aroma del café bajo las condiciones descritas en la tabla 10. Como particularidad se observa un patrón de detección, para fragancia y aroma, homogénea (vectores con direcciones distintas) tanto para café tostado claro (café 2) como para el café tostado medio (café 4). Teniendo en cuenta de la literatura, que el café nivel oscuro (café 6), ya ha sufrido procesos de quemado y caramelización, se puede atribuir este efecto a la distribución no homogénea de los vectores y a su cercanía con el eje central de los componentes principales.

Posteriormente, se tomaron los datos del sensor MQ8, continuando con el análisis de componentes principales, y los resultados son mostrados en la ilustración 34.

En este caso se observó un comportamiento similar al sensor MQ6, donde se pueden extraer patrones de detección que discriminan claramente cada uno de los componentes de fragancia y aroma, con mayor o menor significancia para el café nivel claro (café 2) y medio (café 4), siendo un resultado complementario, cuando se analice la matriz de sensores, pues se discrimina completamente fragancia y aroma con distintos volúmenes.

Sin embargo, de forma muy importante, se logra ver la capacidad que tiene este sensor para poder estructurar el primer patrón para las muestras de café del nivel de tostado oscuro (café 6), desplegando sus vectores cerca al centro cartesiano de forma homogénea. Teniendo en cuenta que el MQ-8 fue diseñado para medir concentraciones de hidrógeno en el aire, se puede atribuir este efecto a las interacciones del café en un área rica en hidrógeno produciendo numerosos compuestos que intervienen en el aumento de la detección del sensor.

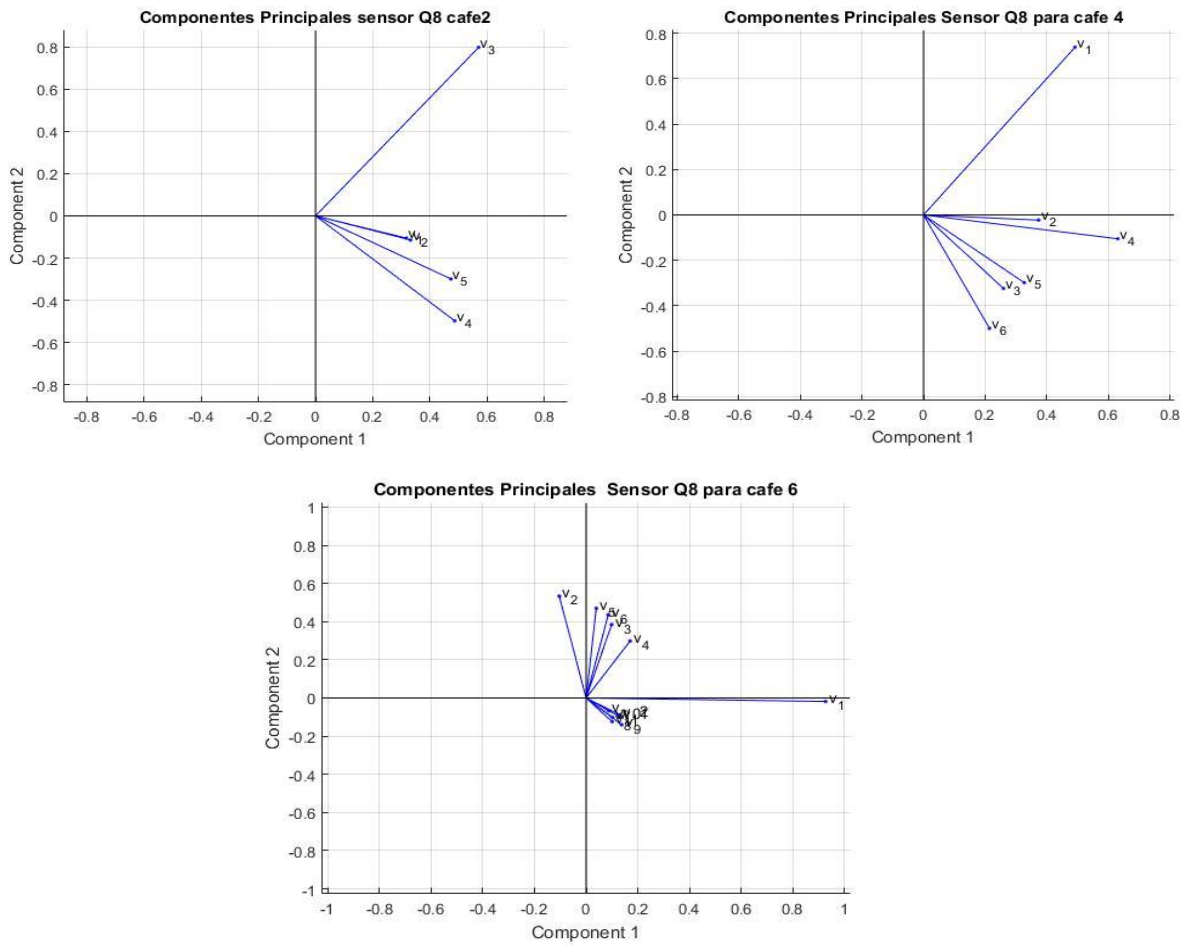


Ilustración 34. Análisis de componentes principales del sensor MQ8. Con café 2,4 y 6 a diferentes

De igual forma, se tomaron los datos del sensor MQ135, de acuerdo a la tabla 10 y el análisis de componentes se muestra en la ilustración 35.

Observando el PCA del sensor MQ135, se puede evidenciar contribuciones significativas aleatorias en los componentes de intensidad de las muestras de café en todos los niveles. esto se puede atribuir a que el sensor ha sido diseñado para mediar la calidad del air, por cuanto tiene alta sensibilidad a componentes como oxígeno, nitrógeno e hidrogeno, complementarios al CO_2 , H_2 componentes contaminantes en general. Este sensor tiene un potencial grande en la medición de componentes orgánicos volátiles, pues todos ellos tiene cadenas largas de elementos, que

desencadenan por procesos químicos o físicos, los componentes anteriormente mencionados, provocando la detección correspondiente.

Aunque se tiene una preferencia a la detección de fragancia y aroma del café 2, (MQ135-v3, MQ1354-v4). Para café 4 se obtiene una contribución significativa homogénea y para el café 6, se preferencia mayormente la fragancia MQ135-v1 y el aroma con MQ135-v2, de forma muy consistente (tamaño y direcciones bien definidas).

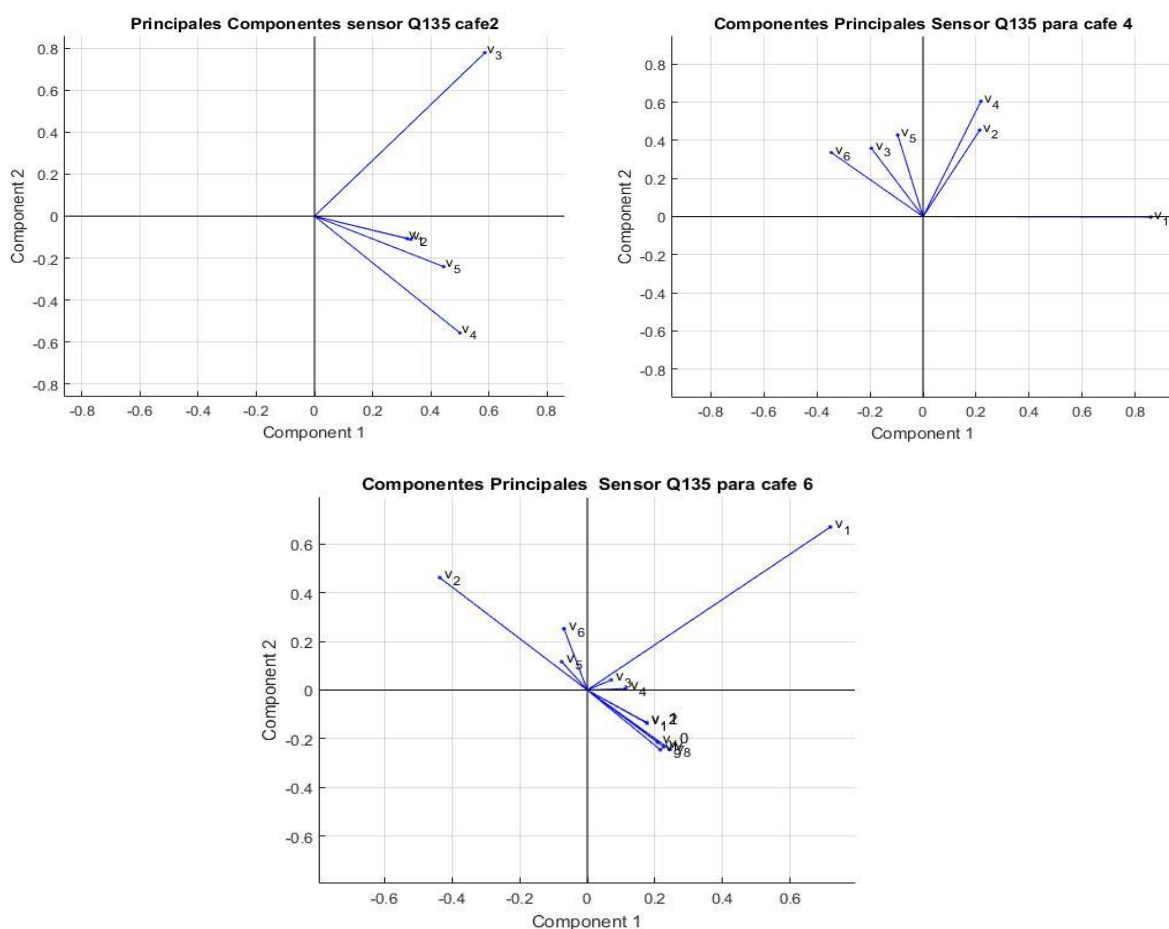


Ilustración 35. Análisis de componentes principales del sensor M Q135, con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes

Finalmente, se presenta el análisis de componentes principales del sensor MQ135, el cual tiene la particularidad que no tiene sistema de acondicionamiento de señal (sensor conectado directamente a los pines de la ilustración 26), con el propósito de evaluar el desempeño del

sensor ante las muestra de café y su posible impacto en los costos del prototipo, que evidencian la viabilidad del sistema de olfato electrónico en el aspecto de costos. El PCA de este sensor se muestra en la ilustración 36.

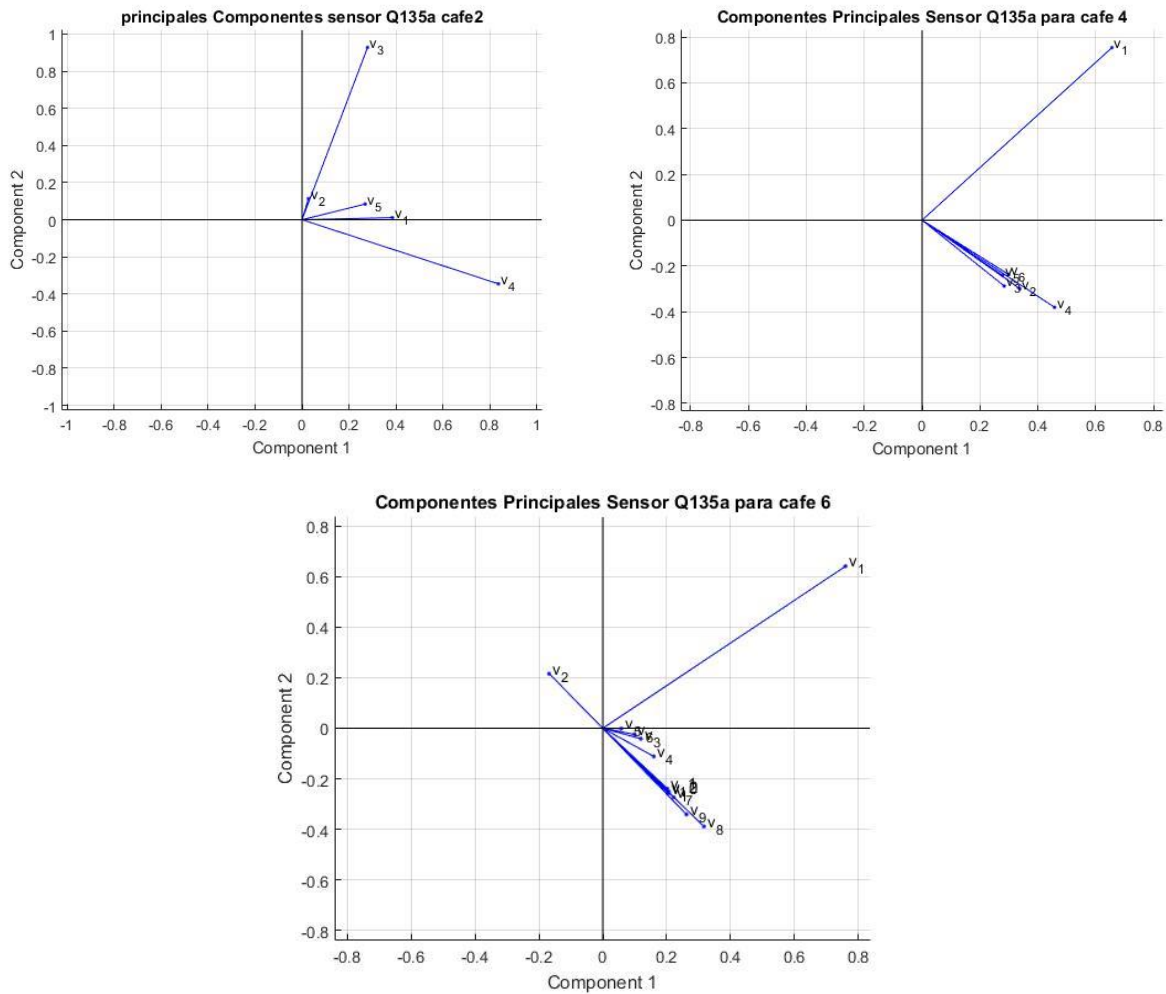


Ilustración 36. Análisis de componentes principales del sensor M Q135a, con café 2,4 y 6 a diferentes volúmenes

El método de componentes principales permite evidenciar la variación de los conjuntos de datos en presencia de dos configuraciones electrónicas del sensor MQ135, se puede apreciar por ejemplo que los sensores MQ135 y MQ135a al ser sensores de un mismo tipo, pero que difieren en aspectos de montaje, tienen componentes principales que privilegian la detección de

diferentes características. Se evidencia una mayor rigurosidad para detectar fragancia y aroma, para las muestras de café claro (café 2, MQ135a-v3 y MQ135a -v4) y oscuro (café 6, MQ135a -v1 y MQ135a -v2), datos que son complementarios y que se verá reflejados en el análisis matricial posterior.

Luego de establecidos los componentes más significativos se integró en un solo sistema , cada uno de los aportes de los sensores, mostrados en la sección anterior. El sistema de olfato electrónico estará soportado entonces por la respuesta de la matriz de sensores, creada a partir de los vectores con los componentes principales predominantes para cada sensor.

Al establecer prioritariamente la capacidad de detección de cada sensor MQ4, MQ6, MQ8 Y MQ135 Y MQ135a, se obtuvo una nueva distribución de componentes principales indicada en la ilustración 37. En este análisis de componentes principales se integró la capacidad del sistema de sensores para contribuir en la detección de las muestras de café, distribuidas en diferentes niveles de tostado (claro (café 2), medio (café 4) y oscuro (café 6)) y bajo diferentes concentraciones (30,60 y 90 cc). Este esquema, permitió determinar la capacidad sensora del sistema, definida por el tamaño y dirección de los vectores del diagrama de componentes principales mostrado.

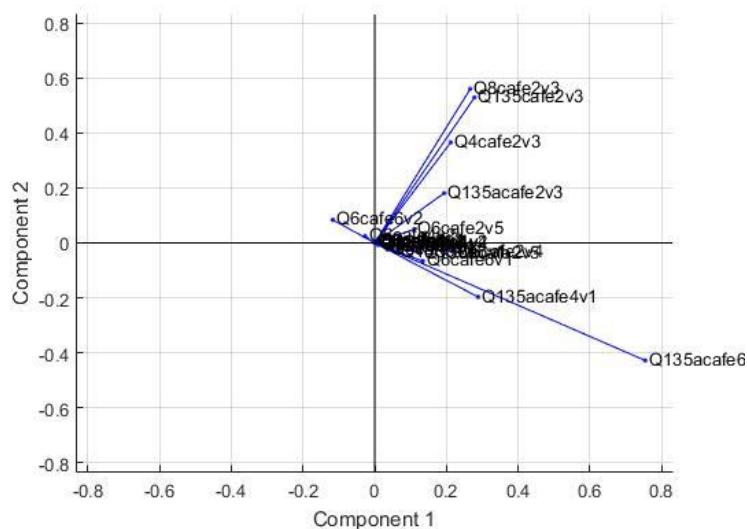


Ilustración 37 Análisis de componentes principales de la matriz de sensores del sistema de olfato electrónico.

Principalmente se observa la preferencia de la detección de las muestras **cafe2-v3**, es decir la **FRAGANCIA (v3)** de la muestra de café tostado claro (café 2) , concentrada 60 cc. (vectores Q8cafe2-v3, Q135cafe2-v3, Q135acafe2-v3).

Lo mismo para el café tostado medio (café 4), **cafe4-v1**, es decir, la **FRAGANCIA** para este tipo de café, con una concentración de 30cc. (vector Q135acafe4-v1).

Por otro lado el **AROMA**, se pudo evidenciar notablemente para la muestra de café oscuro (café 6) con el vector Q135acafe6-v4, correspondiente a una muestra de café concentrada a 60 cc y también para la concentrada a 30cc con el vector Q6cafe6-v2. Esto se puede atribuir a que la muestra con mayor grado de tostado(café 6), contiene mayor cantidad de compuestos orgánicos volátiles , debido a su desarrollo alcanzado en los procesos de maillard y algunos de caramelización, detectados por la matriz en un gran rango.

Debido a que se observa una densidad de vectores en el centro del plano cartesiano del diagrama de PCA, se propone estudiar este comportamiento, realizando la integración de los puntajes(scores) obtenidos, y contribuir a un mayor entendimiento del proceso que lleva a cabo la matriz de sensores con el esquema de detección propuesto. En la ilustración 38 se observan graficados los puntajes.

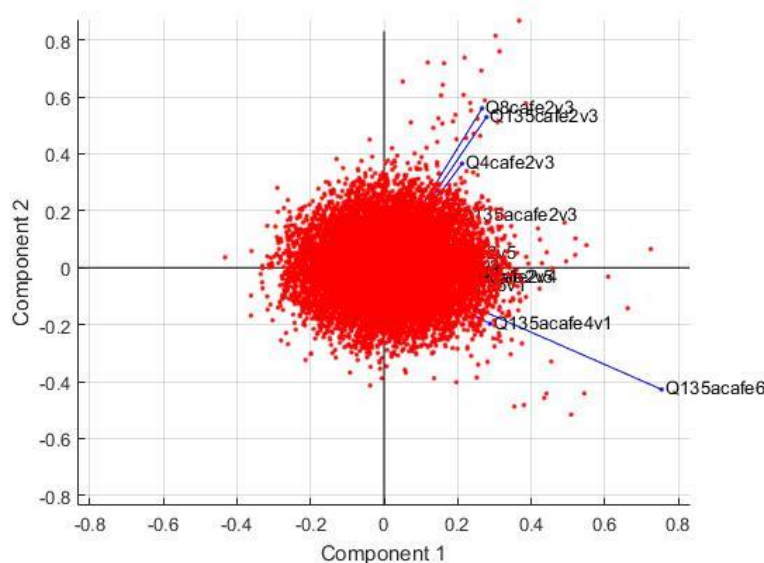


Ilustración 38 comportamiento de los puntajes (score) del sistema de olfato electrónico

La tendencia central de los puntajes hace referencia al hecho de que las variables que fueron escogidas tienen un impacto homogéneo para los dos componentes principales, es decir que el proceso de detección podría mejorar, en cuanto se especifiquen nuevas variables para la detección, como por ejemplo la temperatura, la humedad, la consistencia de las muestras de café tostado y se pueda incluir un proceso de purga del sistema con un gas noble. Este punto se propone como trabajo futuro, cuyo desarrollo se está adelantando en el parque tecnológico del café y su caficultura, TECNICAFÉ, localizado en la venta de Cajibío, Cauca.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, del trabajo se puede concluir lo siguiente.

La detección de fragancia/ aromas para el grado de tostado nivel M6: tostado oscuro, se puede evidenciar con el sensor MQ135a, como lo muestra la gráfica de componentes principales y los vectores respectivos (Q135acafe6), teniendo un aporte significativo en el eje positivo para el componente 1. Este análisis proyecta que, se pueden asociar a este componente 1 del PCA, los humos, CO₂ y en general gases que tienen que ver con la carbonización y el proceso de quemado de sustancias orgánicas, debido al proceso de tostado que la muestra ha sufrido hasta el momento.

De igual forma para la muestra de café de nivel de tostado M2: tostado claro, el cual puede ser detectado por los sensores MQ8, MQ135 y MQ4, de mayor a menor nivel de detección, respectivamente, como lo muestra el PCA en la parte positiva del gráfico, proponiendo un impacto tanto para el componente 1 como para el componente 2. Esto puede atribuirse a los componentes hidrogenados y aromáticos de un café claro y con bajo nivel de tostado, cuyos umbrales son percibidos por los sensores respectivos.

Para la muestra tostado nivel 4: tostado medio, no es tan marcado el peso en el sensor MQ135, sobre el componente 1. Esto se puede atribuir a que los VOC que se encuentran en los tostados medios, reportados por la literatura, presentan una concentración máxima a nivel medio de

tostado mientras que otros muestran un aumento gradual o una disminución y la matriz usada en este trabajo detectaría los umbrales mínimo y máximo, del nivel medio, pues es en este nivel de tostado que se encuentra con una saturación de los componentes orgánicos volátiles particulares de esta muestra.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Britta Folmer, *The Craft and Scienc of Coffee*. Ed Imre Blank.Londos. 2012.
- [2] P. R. A. B. Toledo, L. Pezza, H. R. Pezza, and A. Toci, “Relationship Between the Different Aspects Related to Coffee Quality and Their Volatile Compounds,” *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 15, no. 4, pp. 705–719, 2016.
- [3] T. Thepudom, N. Sricharoenchai, and T. Kerdcharoen, “Classification of instant coffee odors by electronic nose toward quality control of production,”*10th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol. ECTI-CON 2013*, Bangkok, pp. 4–7, 2013.
- [4] J. Rodríguez, C. Durán, and A. Reyes, “Electronic nose for quality control of Colombian coffee through the detection of defects in ‘Cup Tests,’” *Sensors*, vol. 10, no. 1, pp. 36–46, 2010.
- [5] S. Omatu, Y. Ikeda, and M. Yano, “Odor measurement and intelligent classification,” *2015 10th Asian Control Conf. Emerg. Control Tech. a Sustain. World, ASCC 2015*, 2015.
- [6] C. Teresa, R. Hern, O. Fausto, and R. Galaviz, “Clasificación de Datos de Olor de Café provenientes de una Nariz Electrónica Utilizando Redes Neuronales,” *Calzada de Apizaquito S/N Km 1.5, Apizaco, Tlaxcala, C.P. 90300. México* , .pg 2-7.
- [7] S. Reddy, *Materials for Chemical Sensing. Department of Fundamental Chemistry Institute of Chemistry University of São Paulo*. 2017.
- [8] X. Zhang, J. Cheng, L. Wu, Y. Mei, N. Jaffrezic-Renault, and Z. Guo, “An Overview of an artificial nose system,” *Talanta*, 2018.
- [9] M. Son, J. Lee, H. Ko, and T. Park, “Bioelectronic Nose: An Emerging Tool for Odor Standardization,” *Trends Biotechnol.*, vol. 35, no. 4, pp. 301–307, 2017.
- [10] T. Park, *Bioelectronic Nose*, vol. 53, Korea, Republic of (South Korea) *.Journal of Chemical Information and Modeling* no. 9. 2014.
- [11] P. Wang, Q. Liu, K. J. Hsia, C. Wu, and Q. Liu, *Bioinspired Smell and Taste*. Jointly published with Science Press, Beijing 2015.
- [12] M. Shirasu and K. Touhara, “The scent of disease: Volatile organic compounds of the

- human body related to disease and disorder,” *J. Biochem.*, vol. 150, no. 3, pp. 257–266, 2011.
- [13] M. Zhou, Y. Liu, and Y. Duan, “Breath biomarkers in diagnosis of pulmonary diseases,” *Clin. Chim. Acta*, vol. 413, no. 21–23, pp. 1770–1780, 2012.
- [14] J. Lim, J. Park, J. Ahn, H. Jin, S. Hong, and T. Park, “A peptide receptor-based bioelectronic nose for the real-time determination of seafood quality,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 39, no. 1, pp. 244–249, 2013.
- [15] T. Pearce, S. Schiffman, H. Nagle, and J. Gardner, *Handbook of Machine Olfaction*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2016.
- [16] T. Wasilewski, J. Gębicki, and W. Kamysz, “Bioelectronic nose: Current status and perspectives,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 87, no. August, pp. 480–494, 2017.
- [17] H. Patel, R. Austin, J. Barber, and H. Patel, *The Electronic Nose: Artificial Olfaction Technology*. 2014.
- [18] S. Dragonieri *et al.*, “An electronic nose in the discrimination of patients with asthma and controls,” *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 120, no. 4, pp. 856–862, 2007.
- [19] J. Lim, J. Park, E. Oh, H. Ko, S. Hong, and T. Park, “Nanovesicle-Based Bioelectronic Nose for the Diagnosis of Lung Cancer from Human Blood,” *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 360–366, 2014.
- [20] J. Park *et al.*, “A bioelectronic sensor based on canine olfactory nanovesicle–carbon nanotube hybrid structures for the fast assessment of food quality,” *Analyst*, vol. 137, no. 14, p. 3249, 2012.
- [21] H. Ko and T. Park, “Bioelectronic nose and its application to smell visualization,” *J. Biol. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [22] L. Guo, Z. Yang, and X. Dou, “Artificial Olfactory System for Trace Identification of Explosive Vapors Realized by Optoelectronic Schottky Sensing,” *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 5, pp. 1–8, 2017.
- [23] A. Berna, “Metal oxide sensors for electronic noses and their application to food analysis,” *Sensors*, vol. 10, no. 4, pp. 3882–3910, 2010.
- [24] W. Dong, J. Zhao, R. Hu, Y. Dong, and L. Tan, “Differentiation of Chinese robusta coffees according to species, using a combined electronic nose and tongue, with the aid of chemometrics,” *Food Chem.*, 2017.

- [25] M. Czerny and W. Grosch, "Potent odorants of raw Arabica coffee. Their changes during roasting," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 48, no. 3, pp. 868–872, 2000.
- [26] The Instrumentation Systems and Automation Society (ISA), *ANSI/ISA-5.1-1984(R1992) : Instrumentation Symbols and Identification*, vol. 1984, no. 13 July 1992. 1992.
- [27] C. Manuel and D. Acevedo, "Aumento de la selectividad mediante modulación de flujo," 4.1, 4.1.1."
- [28] A. J. Nathan and A. Scobell, *How China sees America*, Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA vol. 91, no. 5. 2012.
- [29] Benítez Urbano, O. J.; Campo Ceballos, D. A. *Evaluación de la calidad el café tostado utilizando herramientas de procesamiento digital de imágenes*, (ACCB) . 2018, Vol. 1 Issue 30, p32-43. 12p.
- [30] Webbook.nist.gov. 2020. *1-Butanol, 3-Methyl-, Acetate*. [online] Available at: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C123922&Mask=2000#Gas-Chrom> [Accessed 20 March 2020].