



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN 1.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“SISTEMA DE DETECCIÓN UV/VIS CON INTELIGENCIA
ARTIFICIAL”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MASTER EN INGENIERIA
ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

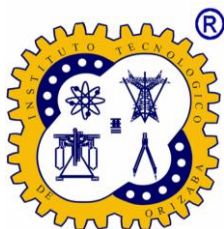
ING. YUDHISTIRA GUERRERO MIRANDA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA

CODIRECTOR DE TESIS:

DRA. ANGÉLICA MARA BELLO RAMÍREZ





Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **3/febrero/2026**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. YUDHISTIRA GUERRERO MIRANDA
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

" SISTEMA DE DETECCIÓN UV/VIS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

DR. OSCAR BÁEZ SENTÍES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OG-13-F06



2026
año de
**Margarita
Maza**





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 8/enero/2026
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

YUDHISTIRA GUERRERO MIRANDA

La cual lleva el título de:

"SISTEMA DE DETECCIÓN UV/VIS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL"

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA

FIRMA

SECRETARIO: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

FIRMA

VOCAL: DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES
CUAUTLE

FIRMA

VOCAL SUP.: DRA. ANGÉLICA MARA BELLO RAMÍREZ

FIRMA

TA-09-18



2026
año de
**Margarita
Maza**



Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz
Tel. 01 (272) 1105360 info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx

CONTENIDO

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN.....	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
JUSTIFICACIÓN	11
HIPOTESIS	12
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO.....	14
CAPITULO 1. ANTECEDENTES	44
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	46
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA (NOMBRE OPCIONAL).....	64
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
CONCLUSIONES.....	92
RECOMENDACIONES	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
PRODUCTOS ACADÉMICOS	99
ANEXOS (OPCIONAL)	101

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Descripción figura.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2. Descripción figura.....**¡Error! Marcador no definido.**

LISTA DE TABLAS

RESUMEN

Palabras Clave: Cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC), detector UV-Vis, inteligencia artificial, redes neuronales artificiales, sistema de bajo costo, química analítica, Raspberry Pi.

En el Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba, existe una necesidad creciente de contar con sistemas de cromatografía líquida funcionales y accesibles para apoyar las actividades de docencia e investigación. Los equipos HPLC comerciales presentan costos de adquisición y mantenimiento elevados, lo que limita su uso continuo en instituciones públicas. En este contexto, el presente trabajo de tesis tiene como objetivo desarrollar un sistema de cromatografía líquida de bajo costo, basado en un detector UV-Vis e integrado con técnicas de Inteligencia Artificial, que permita mejorar la precisión y confiabilidad en la identificación y cuantificación de compuestos orgánicos con grupos cromóforos.

El sistema propuesto está conformado por un detector UV-Vis de celda de flujo acoplado a un equipo de cromatografía líquida, una plataforma de procesamiento embebida basada en Raspberry Pi y un conjunto de algoritmos de redes neuronales artificiales diseñados para el análisis de los cromatogramas. Se estableció una metodología que incluye la adquisición de las señales, su preprocesamiento, la selección de características relevantes y el entrenamiento y validación de los modelos de Inteligencia Artificial a partir de datos experimentales.

Los resultados obtenidos muestran que los modelos de redes neuronales son capaces de capturar patrones en la forma de los picos cromatográficos y en la dinámica de elución, contribuyendo a reducir la influencia de ciertas fuentes de variabilidad experimental y a mejorar la consistencia de las estimaciones respecto al procesamiento convencional. El sistema desarrollado demuestra que es técnicamente viable combinar instrumentación accesible con técnicas de Inteligencia Artificial para fortalecer el análisis cromatográfico en entornos con restricciones presupuestales, ofreciendo una alternativa útil para la formación de estudiantes y el desarrollo de proyectos de investigación aplicada.

ABSTRACT

Keywords: High-performance liquid chromatography (HPLC), UV-Vis detector, artificial intelligence, artificial neural networks, low-cost system, analytical chemistry, Raspberry Pi.

At the Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba, there is an increasing need for functional and affordable liquid chromatography systems to support teaching and research activities. Commercial HPLC equipment involves high acquisition and maintenance costs, which restricts its continuous use in public institutions. In this context, the present thesis aims to develop a low-cost liquid chromatography system, based on a UV-Vis detector and integrated with Artificial Intelligence techniques, in order to improve the precision and reliability of the identification and quantification of organic compounds with chromophoric groups.

The proposed system consists of a flow-cell UV-Vis detector coupled to a liquid chromatography setup, an embedded processing platform based on a Raspberry Pi, and a set of artificial neural network algorithms designed for chromatogram analysis. A methodology was established that includes signal acquisition, preprocessing, selection of relevant features, and training and validation of the Artificial Intelligence models using experimental data.

The results show that the neural network models are capable of capturing patterns in the shape of chromatographic peaks and in the elution dynamics, helping to reduce the influence of certain sources of experimental variability and to improve the consistency of the estimations compared to conventional data processing. The developed system demonstrates that it is technically feasible to combine accessible instrumentation with Artificial Intelligence techniques to enhance chromatographic analysis in budget-limited environments, offering a useful alternative for student training and for the development of applied research projects.

INTRODUCCIÓN

La química analítica dispone de diversas herramientas para estudiar la composición de una muestra, y entre ellas la cromatografía ocupa un lugar central debido a su capacidad para separar y cuantificar múltiples compuestos presentes de manera simultánea. En aplicaciones como el control de calidad, la industria farmacéutica o la investigación, no basta con obtener un perfil cualitativo de la muestra; es indispensable contar con resultados cuantitativos confiables, reproducibles y trazables.

Dentro de las técnicas cromatográficas, la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como uno de los métodos más utilizados para el análisis de compuestos en fase líquida. Sin embargo, en la práctica se siguen enfrentando problemas asociados a la variabilidad experimental, las condiciones de operación, la preparación de la muestra y las propias limitaciones del sistema de detección. Todos estos factores pueden introducir errores que reducen la precisión y la confianza en los resultados.

De manera paralela, el desarrollo reciente de métodos de inteligencia artificial ha abierto nuevas posibilidades para el tratamiento de datos experimentales. En particular, las redes neuronales artificiales permiten identificar patrones y relaciones no lineales en grandes volúmenes de información, lo que las convierte en una herramienta atractiva para apoyar tareas de calibración, predicción y corrección de errores en sistemas analíticos complejos como los cromatográficos.

En este contexto, la presente investigación propone integrar un sistema HPLC con modelos basados en redes neuronales artificiales, con el propósito de mejorar la precisión en la identificación y cuantificación de los componentes de la muestra. La idea central es aprovechar la información generada por el cromatógrafo —tiempos de retención, formas de las señales y respuestas del detector— y procesarla mediante algoritmos de inteligencia artificial que permitan reducir la influencia de las fuentes de error más frecuentes.

Adicionalmente, se plantea el desarrollo de un sistema de cromatografía líquida de menor costo respecto a equipos comerciales convencionales, pero que mantenga un desempeño analítico aceptable en términos de precisión y confiabilidad. La combinación de un hardware más accesible con técnicas de inteligencia artificial busca ofrecer una alternativa viable para laboratorios con recursos limitados, sin sacrificar la calidad de los resultados obtenidos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba, existe una necesidad importante de contar con cromatógrafos de líquidos que permitan atender la demanda de estudiantes y profesores investigadores de los programas de posgrado en ingeniería que se ofrecen en la institución. Estos equipos son indispensables para el desarrollo de proyectos de investigación experimental y para la formación de recursos humanos especializados. Sin embargo, los cromatógrafos de líquidos comerciales tienen costos muy elevados para la mayoría de las instituciones públicas de nuestro país. En el caso particular del Campus Orizaba, se han logrado adquirir algunos equipos mediante proyectos financiados por el CONACYT; no obstante, los servicios de mantenimiento preventivo y correctivo también representan un costo considerable, que no puede ser cubierto ni con el presupuesto ordinario (POA) ni con los programas de fortalecimiento al posgrado. Como consecuencia, varios de estos cromatógrafos han quedado fuera de operación por falta de mantenimiento y actualmente no pueden utilizarse.

JUSTIFICACIÓN

La cromatografía, en términos generales, se basa en la introducción de una muestra en un sistema donde coexisten una fase móvil y una fase estacionaria. En cromatografía líquida, la muestra se disuelve en la fase móvil y es inyectada al flujo que recorre la columna cromatográfica. A medida que los analitos avanzan a lo largo de la columna, interaccionan de distinta manera con la fase estacionaria, lo que provoca su separación en el tiempo. A la salida de la columna, un detector convierte estas variaciones en una señal analógica que posteriormente se digitaliza para su registro y análisis.

Este principio de operación resulta relativamente accesible desde el punto de vista de implementación electrónica y de instrumentación. En el Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba, se cuenta con personal capacitado tanto en Ingeniería Electrónica como en Ingeniería Química, lo que crea un entorno propicio para diseñar y construir un sistema de cromatografía líquida propio. Adicionalmente, la incorporación de modelos de inteligencia artificial para el procesamiento de las señales generadas por el equipo permite mejorar la interpretación de los datos, reducir errores y aumentar la confiabilidad de los resultados, ofreciendo así una alternativa de menor costo frente a los cromatógrafos comerciales sin renunciar a un desempeño analítico adecuado.

HIPOTESIS

La aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial, empleando los datos generados por un detector de cromatografía líquida, permitirá mejorar la precisión de un sistema HPLC al reducir los errores de análisis y aumentar la capacidad de identificación y la determinación cuantitativa de los analitos presentes en la muestra.

OBJETIVOS

Desarrollar un sistema de bajo costo basado en inteligencia artificial que utilice la información generada por un equipo de HPLC para reconocer patrones y relaciones en las señales cromatográficas, con el fin de mejorar la exactitud y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proporcionar una herramienta de software efectiva para la mejora de calidad de los análisis de HPLC.
- Aplicar algoritmos de inteligencia artificial a los datos obtenidos por un sistema de cromatografía, considerando la arquitectura de las redes y los algoritmos de aprendizaje adecuados.
- Validar la eficacia de las redes neuronales artificiales desarrolladas utilizando muestras adicionales y comparar los resultados estándares de referencia o técnicas de validación externas.
- Analizar de manera crítica los resultados obtenidos, evaluar las variaciones en la precisión del método y examinar el impacto del uso de redes neuronales artificiales sobre el desempeño del sistema cromatográfico.

CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO

5 **SISTEMA DE DETECCIÓN UV/VIS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

CAMPO TECNICO DE LA INVESTIGACIÓN

10 La presente invención pertenece al campo técnico de la ingeniería química, particularmente al campo técnico del área de instrumentación de la química analítica, específicamente se refiere a un sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias compuestas orgánicas que contienen grupos cromóforos. El sistema de detección UV/Vis busca mejorar la resolución,
15 eficiencia y precisión de los análisis de sustancias orgánicas compuestas que presentan grupos cromóforos.

ESTADO DE LA TÉCNICA

20 La cromatografía de líquidos de alto rendimiento (HPLC, por sus siglas en inglés) desempeña un papel fundamental en diversas industrias, como la química, farmacéutica, alimentaria, medioambiental y en la investigación científica. Este método analítico permite el análisis y la separación de muestras en sus componentes químicos, lo cual es esencial para el control de calidad, la seguridad
25 y la investigación en los diferentes campos de estudio.

 El HPLC se basa en diferentes tipos de detectores, como los detectores de UV/Vis (Ultravioleta/Visible), índice de refracción, fluorescencia, conductividad, electroquímicos, dispersión de luz, amperometría y detectores de masa. La elección del detector depende de la naturaleza de los compuestos que se están analizando
30 y de los requisitos específicos del análisis. Por ejemplo, los detectores de UV/Vis son ampliamente utilizados para compuestos orgánicos que absorben luz en el rango UV/Vis, mientras que los detectores de índice de refracción son ideales para

5 analizar compuestos no absorbentes o con poca absorbancia en el rango UV/Vis, como azúcares y polímeros.

El HPLC ha demostrado ser una técnica analítica confiable y ampliamente aceptada en la comunidad científica. Su aplicabilidad en una amplia gama de industrias y su capacidad para proporcionar resultados precisos y reproducibles son
10 aspectos clave que contribuyen a la mejora de la calidad de los productos y la investigación científica.

Centrándonos en el sistema de detección de un HPLC, en particular en un sistema con detector UV/Vis, es importante señalar que los sistemas de detección de HPLC existentes no aprovechan el uso de la inteligencia artificial para mejorar la
15 obtención y la interpretación de los datos. Por esta razón, la presente invención se basa en la aplicación de la inteligencia artificial en sistemas de detección UV/Vis para agilizar y automatizar varios aspectos del proceso, como la optimización de los parámetros de separación, la identificación de picos y la interpretación de los resultados, utilizando algoritmos avanzados y técnicas de aprendizaje automático,
20 para desarrollar modelos predictivos y sistemas de toma de decisiones que mejoren la precisión y eficiencia de los sistemas de detección UV/Vis para un sistema HPLC.

Actualmente en el estado del campo existen patentes y modelos de utilidad que abordan temas con similitudes a lo que se busca en la presente invención, pero, ninguno está enfocado a sistemas de detección UV/Vis.

25 Entre las fuentes encontradas esta la patente **MX 399884 B** "Aparato para la determinación de conductividad eléctrica, K, Ca, Mg, y Na, utilizando un sensor capacitivo con técnicas integradas de Espectroscopia y Redes Neuronales", la invención hace referencia a un aparato portátil para la determinación de la CE, K, Ca, Mg y Na utilizando un sensor capacitivo en suelos mediante la utilización de
30 técnicas integradas de espectroscopía y la integración de algoritmos de redes neuronales para hacer posible la determinación de dichas variables con inteligencia artificial supervisada.

5 La patente con solicitud **MX/a/2020/010504** "Espectroscopia Raman y aprendizaje automático para el control de calidad", la invención hace referencia a métodos para determinar la calidad de polímeros, particularmente, poliolefinas. Los métodos involucran espectroscopia Raman e inteligencia artificial para calcular las propiedades y/o características de los polímeros.

10 La patente con solicitud **MX/a/2019/002505** "Sistema no invasivo para el monitoreo de la concentración de glucosa en la sangre", en la cual la invención hace referencia a un método no invasivo para la determinación de glucosa en la sangre, que comprende la proyección de un haz de luz láser en el espectro visible, con longitud de onda de 650 nanómetros, enfocándolo hacia el área de la uña en la
15 punta del dedo de una persona, de manera que se ilumine y permita, por medio de espectroscopia visible, medir la energía del haz de luz que atraviesa el medio dispuesto por una punta del dedo. La energía del haz de luz es recibida por un multisensor fotosensible que genera un fotograma con la visualización en RGB de la punta del dedo en ese instante, y de la cual, se obtiene la energía de su señal
20 representada por el histograma del canal azul. Por medio de ésta, se cuantifica la concentración de glucosa en sangre utilizando, preferentemente, análisis multivariado lineal o no lineal, como por ejemplo, análisis de regresión por mínimos cuadrados, o análisis por medio de redes neuronales artificiales.

 Es evidente la necesidad de brindar un sistema de detección UV/Vis e
25 Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que contienen grupos cromóforos capaz de optimizar los parámetros de entrada al utilizar algoritmos de optimización con IA, y así, encontrar los mejores valores de los parámetros de separación, tales como la elección de disolvente, la temperatura, el flujo y la composición de la fase móvil, ayudando a mejorar la resolución y la
30 eficiencia de la separación.

 Existen desarrollos tecnológicos que exploran el uso de inteligencia artificial en combinación con estudios de espectroscopia para la determinación de elementos específicos, tal como se mencionó anteriormente en la revisión de las patentes, pero, hasta la fecha, no se ha desarrollado un sistema de detección UV/Vis que

5 integre algoritmos de inteligencia artificial y que mejore la comprensión de los
resultados generados por dicho sistema. Por lo cual, la presente invención consiste
en el desarrollo de un sistema de detección UV/Vis que integre algoritmos de
inteligencia artificial y que mejore la comprensión de los resultados para su uso en
instituciones educativas y de investigación, esto con la finalidad de brindar la
10 posibilidad de realizar investigaciones de alta calidad.

ESPECIFICACIÓN DE LA INVENCION

La presente invención consiste en el desarrollo de un sistema de detección
15 UV/Vis que integre algoritmos de inteligencia artificial y que mejore la comprensión
de los resultados para su uso en instituciones educativas y de investigación, esto
con la finalidad de brindar la posibilidad de realizar investigaciones de alta calidad.

Un objetivo más de la presente invención es brindar un sistema de detección
UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas
20 compuestas que contienen grupos cromóforos. Este sistema será capaz de detectar
picos y analizar los datos con IA, donde la IA puede ser entrenada para identificar y
detectar de manera más precisa los picos correspondientes a los componentes de
una muestra. Esto incluye la detección de picos solapados, la eliminación de ruido
y la determinación de áreas de pico de forma automática. Además, la IA puede
25 analizar los datos generados por el sistema de detección UV/Vis e Inteligencia
Artificial para la identificación de sustancias compuestas orgánicas que contienen
grupos cromóforos y proporcionar resultados más precisos y confiables.

Otro objetivo adicional de la presente invención es brindar un sistema de
detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias
30 orgánicas compuestas que contienen grupos cromóforos, capaz de interpretar los
resultados generados con la ayuda de la IA. Esta interpretación se lleva a cabo
haciendo análisis estadísticos, correlaciones y comparaciones con datos de

5 referencia para obtener conclusiones más precisas sobre la composición y calidad de una muestra.

El último objetivo de la presente invención es brindar un sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que contienen grupos cromóforos, capaz de monitorear el rendimiento del sistema y predecir posibles fallos o necesidades de mantenimiento con la ayuda de la IA. Esto permitiendo tomar medidas preventivas para evitar interrupciones en los análisis y asegurar un funcionamiento óptimo del equipo.

Por lo anterior, la presente invención tiene como objetivo proporcionar un sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que contienen grupos cromóforos con su propia interfaz gráfica integrada. Esta interfaz permitirá configurar, operar y monitorear todo el proceso del sistema sin la necesidad de conectarlo a un equipo de cómputo externo.

20

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La presente invención está conformada por 3 componentes clave:

- 1) Detector UV/Vis
- 25 2) Tarjeta electrónica.
- 3) Pantalla táctil LCD (por sus siglas en ingles Liquid Crystal Display) de 10 pulgadas integrada a la tarjeta electrónica.

La figura 1A muestra una vista frontal de un detector UV/Vis y en la parte frontal se encuentra una pantalla LCD que muestra información relevante, como configuraciones y resultados. También tiene botones para facilitar la navegación y el ajuste de parámetros.

30

5 En la parte superior frontal izquierda del detector se encuentra la unidad de lámpara, que consta de una lámpara de deuterio y una lámpara de tungsteno. Estas lámparas proporcionan la fuente de luz necesaria para la detección UV/Vis.

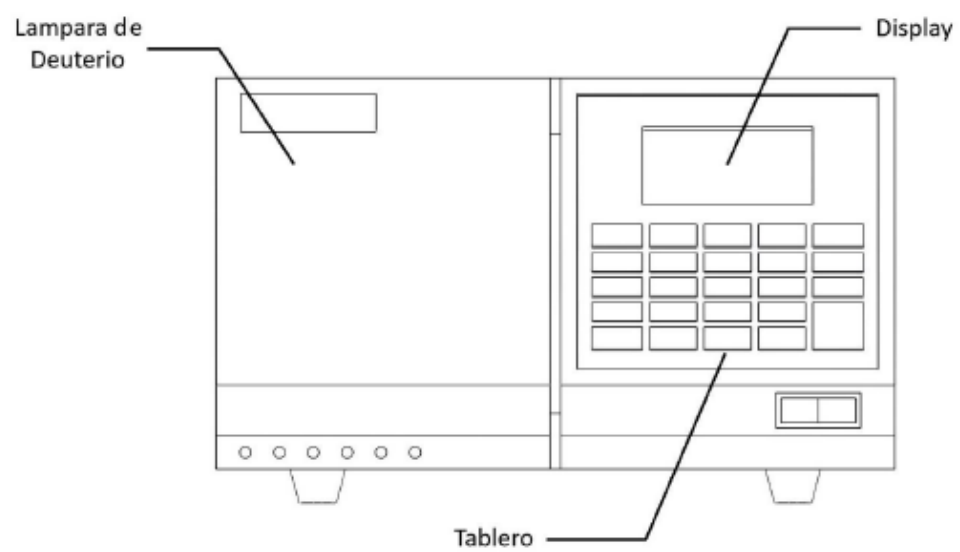
La figura 1B muestra la parte trasera del detector donde se encuentran las conexiones para la entrada y salida de muestras, así como los puertos de
10 comunicación para la conexión con otros dispositivos o sistemas de análisis.

La figura 2 describe como en la presente invención, por medio de un cable conectado a las salidas analógicas del detector UV/Vis, se comunican los datos obtenidos por el detector a la tarjeta electrónica.

La figura 3 muestra la parte superior de la tarjeta electrónica, donde se
15 encuentra una serie de puertos y conectores. Estos incluyen:

Puertos USB (1), puertos de video (2), puerto Ethernet (3), ranura para tarjeta microSD (4), conectores GPIO (5) y puerto de alimentación (6).

La figura 4A muestra la parte frontal de la pantalla táctil de 10 pulgadas, donde se visualizará la interfaz gráfica del sistema de detección UV/Vis. Por otro lado, en
20 la figura 4B se muestra la parte trasera de la pantalla táctil, en la cual se observa la tarjeta electrónica acoplada mediante un conector especial de HDMI.



5

Figura 1A

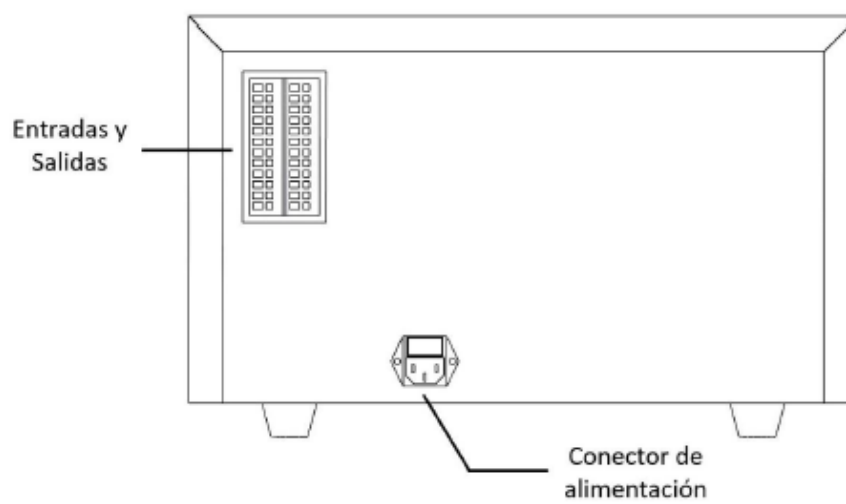


Figura 1B

10

5

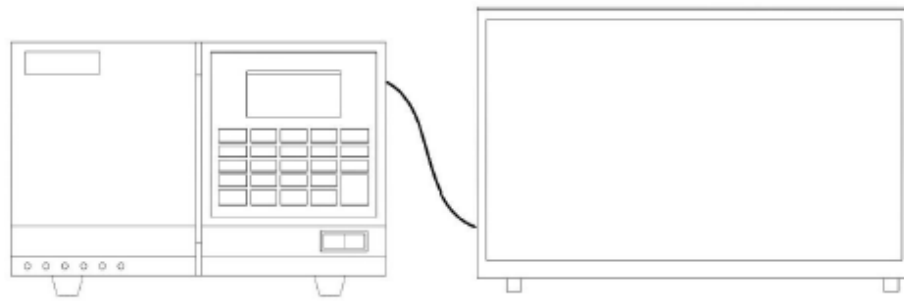
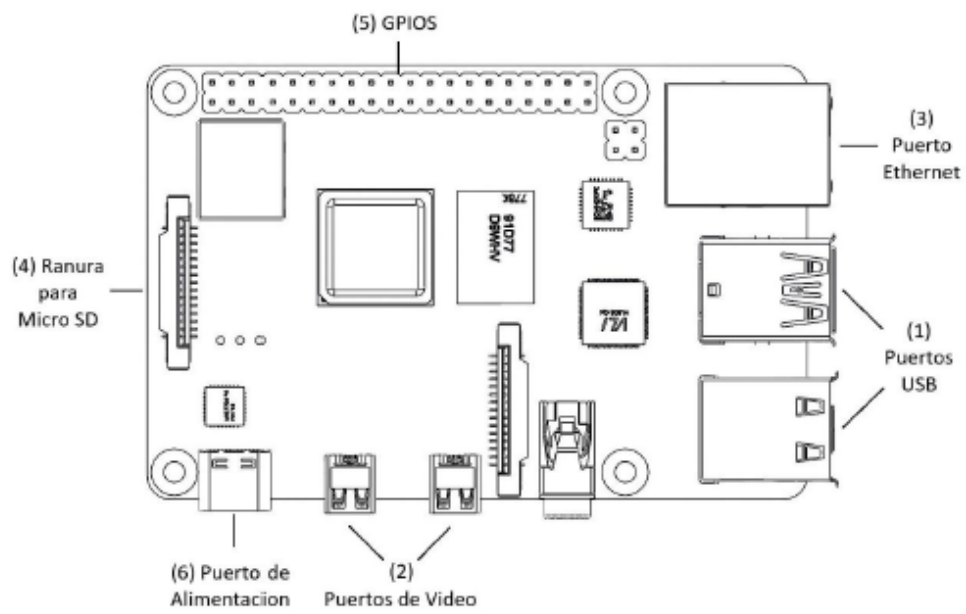


Figura 2



10

Figura 3

5



Figura 4A

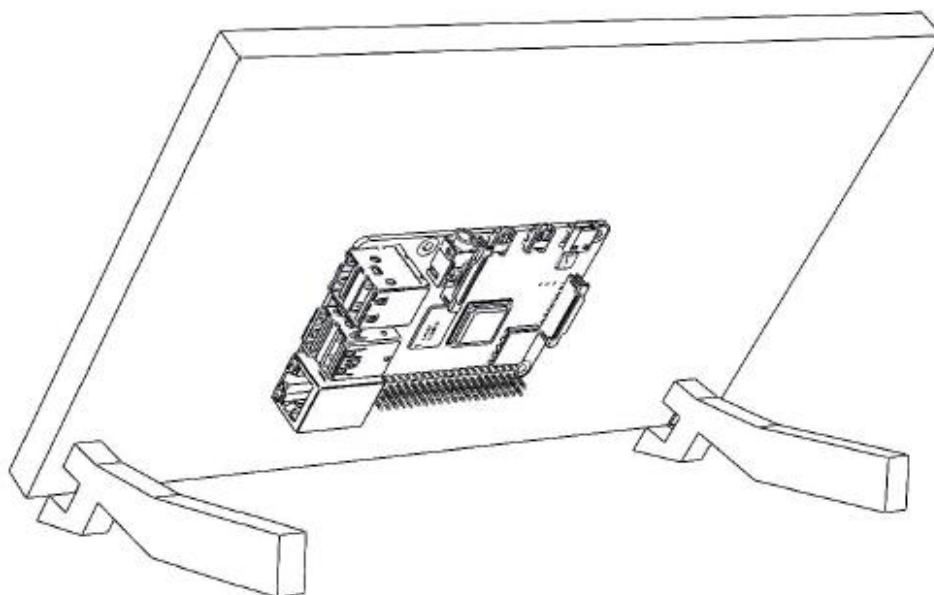


Figura 4B

MEJOR MÉTODO PARA LLEVAR A CABO LA INVENCIÓN

La presente invención se refiere a un sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que presentan grupos cromóforos. Estos grupos son estructuras químicas capaces de absorber luz en una región específica del espectro electromagnético, incluyendo compuestos aromáticos, pigmentos, colorantes y fármacos entre otros.

De acuerdo con la presente invención, el sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que contienen grupos cromóforos. Este sistema consta de tres partes principales:

En primer lugar, se encuentra el detector UV/Vis. Este detector utiliza el principio de la espectroscopia UV/Vis y desempeña un papel fundamental en la captación y medición de la absorbancia de la luz por parte de los compuestos a analizar. Para ello, el detector UV/Vis cuenta con una lámpara de deuterio que emite luz en el rango de la luz ultravioleta (UV) y una lámpara de tungsteno que emite luz en el rango de la luz visible (Vis). Estas lámparas proporcionan una fuente de luz de amplio espectro, abarcando desde aproximadamente 190 nm hasta 700 nm, lo que permite la detección de una amplia gama de compuestos.

Cuando una muestra pasa a través del detector, la luz emitida por las lámparas atraviesa la muestra y parte de esa luz es absorbida por los componentes presentes en la muestra. El detector mide la cantidad de luz absorbida en función de la longitud de onda, generando así un espectro de absorbancia. Cabe destacar que el detector UV/Vis ofrece la capacidad de seleccionar la longitud de onda específica a la cual se desea realizar la detección, lo que brinda flexibilidad en el análisis de diferentes sustancias.

5 La señal de absorbancia generada por el detector es captada y procesada
electrónicamente, convirtiéndola en datos cuantitativos que representan la
concentración de las sustancias en la muestra. Estos datos se obtienen a través de
los puertos de salidas analógicas que están disponibles en el detector UV/Vis.
Posteriormente, estos datos se utilizarán para el procesamiento adicional mediante
10 técnicas de inteligencia artificial.

Luego, se encuentra la parte de control, configuración y procesamiento, la cual
integra la Inteligencia Artificial y se ejecuta a través de una tarjeta electrónica.

Partiendo desde antes de comenzar el análisis de la muestra, se lleva a cabo
una optimización de los parámetros de entrada mediante algoritmos de optimización
15 con IA. Estos algoritmos buscarán los mejores valores de separación, incluyendo la
elección de disolvente, temperatura, flujo y composición de la fase móvil.
Contribuyendo con esta optimización a mejorar la resolución y la eficiencia de la
separación.

Además, durante y al final de las lecturas obtenidas por el detector UV/Vis, el
20 sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de
sustancias orgánicas compuestas que presentan grupos cromóforos, llevará a cabo
un análisis de los datos utilizando IA para detectar picos. La IA, previamente
entrenada, identificará con mayor precisión los picos correspondientes a los
componentes de una muestra, incluyendo la detección de picos solapados, la
25 eliminación de ruido y la determinación automática de áreas de picos.

Otra función destacada que desempeñará el sistema de detección UV/Vis e
Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que
presentan grupos cromóforos, será su capacidad para interpretar los resultados con
la ayuda de la IA. Esto se logrará mediante análisis estadísticos, correlacionales y
30 comparaciones con datos de referencia, lo que permitirá obtener conclusiones más
precisas sobre la composición y calidad de una muestra.

Para concluir esta sección, el sistema de detección UV/Vis e Inteligencia
Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que presentan

5 grupos cromóforos, incluirá también una función de monitoreo de rendimiento. Esta función permitirá predecir posibles fallos o necesidades de mantenimiento gracias a la IA, brindando la posibilidad de tomar medidas preventivas para evitar interrupciones en los análisis y garantizar un funcionamiento óptimo del equipo.

10 Finalmente, la parte de la pantalla táctil LCD de 10 pulgadas integrada a la tarjeta electrónica permite el monitoreo y control del sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias compuestas orgánicas que presentan grupos cromóforos. Gracias a su capacidad táctil, esta pantalla permite no solo la visualización de los gráficos de los picos de las lecturas de absorbancia de la muestra, sino también la interacción y toma de decisiones en el control del sistema. Además, de que se mostrarán los resultados finales del análisis realizado, 15 brindando una visión completa y accesible de los datos obtenidos.

REIVINDICACIONES DEL MODELO DE UTILIDAD

20

Habiendo descrito suficientemente este modelo de utilidad, consideramos como una novedad y por lo tanto reclamando como de propiedad lo contenido en lo siguiente:

- 25 1. Un sistema detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que presentan grupos cromóforos, conformado por módulos que se comprende de:
- Un primer módulo que consiste en un detector de UV/Vis que su función consiste en medir la concentración de sustancias compuestas orgánicas que presentan grupos cromóforos. 30
 - Un segundo módulo con la Tarjeta electrónica e Inteligencia artificial con capacidad de:

- 5
 - Procesar parámetros de entrada y optimizar los valores de los parámetros de separación, como la elección de disolvente, temperatura, flujo y la composición de la fase móvil.
 - Procesar la información proporcionada por un sistema de detección UV/Vis, que estima cuantitativamente sustancias orgánicas compuestas que presentan grupos cromóforos.
- 10
 - Procesar y monitorear el rendimiento del sistema y predecir posibles fallos o necesidades de mantenimiento.
- Un tercer módulo que consiste en una pantalla táctil LCD de 10 pulgadas integrada a la Tarjeta electrónica con una interfaz gráfica para control y

15 monitoreo del sistema.

RESUMEN DE LA INVENCION

20

La presente invención se trata de un sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias orgánicas compuestas que contienen grupos cromóforos. Los objetivos principales de esta invención son optimizar los parámetros de separación mediante algoritmos de optimización con IA, detectar y
 25 analizar picos de forma precisa utilizando IA, interpretar los resultados generados mediante análisis estadísticos y comparaciones con datos de referencia, monitorear el rendimiento del sistema y predecir posibles fallos o necesidades de mantenimiento con la ayuda de IA, y ofrecer una interfaz gráfica integrada para configurar, operar y monitorear todo el proceso sin necesidad de una conexión
 30 externa a un equipo de cómputo. Con estas funcionalidades, el sistema de detección UV/Vis busca mejorar la resolución, eficiencia y precisión de los análisis de sustancias compuestas orgánicas que presentan grupos cromóforos.

Orizaba, Ver a **01/noviembre/2023**
Oficio No. DIR/097/2023**A QUIEN CORRESPONDA
PRESENTE**

Por este medio se hace constar que el CRODE Orizaba, recibió en comodato, el día 1 de noviembre de 2023, la invención titulada: " SISTEMA DE DETECCIÓN UV/VIS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL", la cual se encuentra en trámite de registro de Modelo de Utilidad ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial, a través del Centro de Patentamiento de este Centro, la cual fue diseñada y construida por los Investigadores del Tecnológico Nacional de México: Albino Martínez Sibaja, Alejandro Alvarado Lassman, Angélica Mara Bello Ramírez, José Pastor Rodríguez Jarquin, Rubén Posada Gómez y Yudhistira Guerrero Miranda.

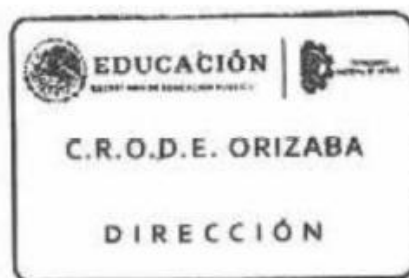
Esta invención consiste en un sistema de detección UV/Vis e Inteligencia Artificial para la identificación de sustancias compuestas orgánicas que contienen grupos cromóforos. Los objetivos principales de esta invención son optimizar los parámetros de separación mediante algoritmos de optimización con IA, detectar y analizar picos de forma precisa utilizando IA, interpretar los resultados generados mediante análisis estadísticos y comparaciones con datos de referencia, monitorear el rendimiento del sistema y predecir posibles fallos o necesidades de mantenimiento con la ayuda de IA, y ofrecer una interfaz gráfica integrada para configurar, operar y monitorear todo el proceso sin necesidad de una conexión externa a un equipo de cómputo. Con estas funcionalidades, el sistema de detección UV/Vis busca mejorar la resolución, eficiencia y precisión de los análisis de sustancias compuestas orgánicas que presentan grupos cromóforos.

Actualmente se está evaluando el potencial de explotación comercial de esta invención en este Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo de Orizaba.

ATENTAMENTE*Excelencia en Educación Tecnológica
Por el fortalecimiento de la educación***DR. RUBEN POSADA GÓMEZ****DIRECTOR**

ccp. Archivo

RPG / MMR

Prolongación de la Calle 25/N Col. Agrícola Librado Rivera, C.P.94380
Tel. (272) 7252464 y (272) 7256755 tecnm.mx | dir_crodeorizaba@tecnm.mx

5

**SISTEMA DE EXTRACCIÓN E INYECCIÓN AUTOMATIZADO CON
SUPERVISIÓN EN TIEMPO REAL BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL.**

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION

10 La invención presentada forma parte del campo técnico de ingeniería química analítica, particularmente enfocada en el área de análisis cromatográfico, una invención que permite extraer e inyectar muestras de volumen específico y que a su vez cuenta con supervisión en tiempo real del volumen almacenado en el recipiente de muestras, realizando el monitoreo a través de algoritmos de inteligencia artificial, reduciendo lecturas erróneas dentro del sistema de análisis cromatográfico al que
15 se encuentre acoplado. La invención cumple con especificaciones de química analítica para una correcta manipulación e inyección de sustancias dentro de los análisis de cromatografía líquida.

ESTADO DE LA TÉCNICA

20 Actualmente existen múltiples técnicas empleadas en el área de química analítica, enfocadas a brindar el mejor resultado en cromatografía líquida, particularmente en métodos de manipulación de muestras para su inyección dentro del sistemas de análisis cromatográficos.

Entre las diferentes técnicas de inyección de muestras dentro del sistema de cromatografía líquida, se pueden mencionar la extracción e inyección del analito
25 dentro del flujo móvil de forma manual, realizando una inyección con jeringas graduadas presurizadas, cargando el analito dentro de la válvula de inyección del equipo de análisis, almacenando dicha muestra en el bucle de la válvula, siendo cargada dentro del flujo móvil a través del accionamiento de la válvula, realizando
30 la carga de forma manual dentro del sistema para su análisis. Actualmente la técnica más común en laboratorios de química analítica es la manipulación de la muestra a

5 través de un sistema de inyección automatizado que permite una manipulación de la sustancia de forma precisa y repetible dentro de los análisis cromatográficos.

Un equipo de inyección automático es un dispositivo de alto costo, debido a su complejidad y mantenimiento, sin mencionar la curva de aprendizaje que representa el operar este dispositivo. Al ser un equipo de alto nivel, su adquisición dentro de
10 muchos laboratorios se torna difícil, los centros de investigación no cuentan con recursos suficientes para adquirir estos dispositivos, por lo que se considera necesario el empleo de tecnologías alternas, sin perder la capacidad de realizar análisis precisos y repetibles dentro del laboratorio.

La manipulación de sustancias por medio de un inyector automático ha demostrado
15 ser una técnica que reduce errores habituales dentro de análisis cromatográficos, errores provocados por la inexactitud natural del ser humano, errores de pulso al extraer e inyectar un volumen específico de la muestra a analizar dentro del sistema de cromatografía, factores que provocan una baja precisión y repetibilidad en cada análisis. Pese a esto, el inyector automático aun no puede cubrir otro tipo de errores
20 presentes dentro del sistema, el dispositivo no tiene conocimiento del volumen restante en el recipiente de muestras (vial o tubos de ensayo), el realizar una extracción en un recipiente con un volumen menor al contemplado permite la entrada de aire (burbujas) en la jeringa, despresurizando todo el sistema de cromatografía, lo que da paso a malas lecturas en los análisis, afectando
25 respuestas en el detector, sin mencionar el riesgo a causar daños físicos a los componentes que conforman el cromatógrafo, significando una pérdida de tiempo y recursos del equipo por un mal empleo de inyección.

El modelo de utilidad propuesto, ofrece un inyector automático con operación en el rango de los microlitros, permitiendo alta precisión y repetibilidad en inyecciones de
30 sustancias para su análisis en un equipo de cromatografía líquida, con la característica particular de contar con supervisión en tiempo real del volumen presente en el recipiente de muestras a través de inteligencia artificial, reduciendo ampliamente márgenes de error, en comparación con otros dispositivos de inyección automáticos, destacando la capacidad de aprendizaje del sistema que

5 permite almacenar un historial de inyecciones, comparar datos de las inyecciones en relación con el nivel de volumen del recipiente y el tipo de sustancia, además de la estimación de inyecciones restantes en relación al volumen disponible del recipiente.

Un ejemplo de sistema muestreador automático es la patente AU2008252041
10 llamada "Autosampler for High-Performance Liquid Chromatography", consta de una válvula de inyección de alta presión con una vida útil extendida, particularmente en operación a alta presión. Debido a la geometría de los componentes, los procesos de conmutación de la válvula no se ven afectados casi por ninguna interrupción, no obstante, omite la supervisión de volumen del analito dentro del
15 recipiente de muestras, el óptimo funcionamiento de la válvula de inyección se vería afectado por una entrada de aire dentro del sistema. Otro ejemplo de mejoras en el sistema de inyección es la patente ES2744351 titulada "Bomba e inyector para cromatografía líquida", la cual ofrece una válvula con una combinación de un inyector y una bomba de presión, reduciendo la interconexión de dichos
20 componentes entre sí, facilitando su portabilidad y ofreciendo un margen de inyección en nano litros, empleando un mínimo de fase móvil durante los análisis, sin embargo, los resultados esperados en el empleo del dispositivo mencionado dependen estrictamente de un buen empleo del analito en la válvula de inyección, por lo que se debe contemplar supervisión del recipiente de muestras para evitar la
25 formación de burbujas que producen errores dentro de los análisis, dicha característica no está disponible en la patente mencionada.

Entre los equipos disponibles para la manipulación e inyección de sustancias en pequeños volúmenes se encuentra la patente ES2401831 titulada "Inyector Automático con mensajería de estados", cuenta con inyección automática por medio
30 de una jeringa para múltiples aplicaciones que requieran empleo de sustancias de bajo volumen, con la característica de una interfaz gráfica de usuario, permitiendo programar la cantidad de volumen a inyectar, proporcionando notificaciones de cada proceso en el sistema, incluyendo notificaciones del volumen restante en la jeringa después de una inyección, no obstante, el sistema carece de recipientes de analitos

5 para múltiples inyecciones, sin mencionar la falta de monitoreo en tiempo real por medio de inteligencia artificial.

La patente ES2915839 titulada "Intercambio de líquidos rápido en cromatografía de líquidos", ofrece un dispositivo y procedimiento de inyección que permite la preparación y manipulación de múltiples muestras en un solo análisis, con
10 aplicaciones al área de espectrometría de masas, no obstante, el dispositivo requiere más de un solo analito, requiere de múltiples recipientes con diferentes sustancias a analizar, recipientes carentes de supervisión en tiempo real, lo que abre la posibilidad a la entrada de aire en un procedimiento tan complejo como el intercambio de sustancias en pleno análisis de cromatografía.

15 Cabe resaltar cada uno de los desarrollos tecnológicos existentes que emplean el uso de inyectores automáticos y dispositivos enfocados a la manipulación de sustancias con volúmenes pequeños, con sus respectivas ventajas en el campo de aplicación para el que fueron diseñados, sin embargo, estos dispositivos no cuentan con la capacidad de realizar una supervisión en tiempo real del volumen restante
20 del analito depositado en el recipiente de muestras.

La presente invención emplea un sistema de inyección automático en el orden de los microlitros, con la característica de contar con monitoreo en tiempo real de volumen del analito disponible a inyectar, por medio del uso de inteligencia artificial a través de algoritmos de redes neuronales con la capacidad de calcular el número
25 de inyecciones disponibles antes de que se agote el volumen del analito, incluyendo mensajería del nivel del volumen en tiempo real por medio de una interfaz gráfica para su fácil operación.

ESPECIFICACIÓN DE LA INVENCION

30 La invención ofrece un inyector automático en el orden de los microlitros, el cual tiene como objetivo suministrar sustancias de bajo volumen dentro de la válvula de inyección motorizada para su carga dentro de un sistema de cromatografía líquida acoplado al inyector propuesto, supervisando en tiempo real el volumen disponible

5 en el recipiente de muestras empleando un sensor de presión diferencial, se aplica una conversión utilizando los datos capturados por el sensor, se logra calcular la cantidad aproximada del volumen dentro del recipiente de muestras en el inyector, permitiendo notificaciones acerca del volumen disponible en tiempo real, ofreciendo un estimado del número de inyecciones disponibles en el recipiente empleando
10 algoritmos de inteligencia artificial.

La invención propuesta utiliza técnicas de inyección empleadas en la cromatografía líquida, para la manipulación de sustancias en el orden de los microlitros, realizando una aplicación de sustancias en un rango de 1 μ l a 10 μ l dentro de la válvula de inyección por medio del accionamiento de una jeringa presurizada dentro del
15 sistema de cromatografía al que la presente invención se encuentre acoplado. La inyección de sustancias reduce progresivamente el volumen existente en el recipiente de muestras, lo que requiere de monitoreo en todo momento del volumen por medio de notificaciones.

La presente invención está equipada, con algoritmos de inteligencia artificial (IA), basado en redes neuronales artificiales previamente configuradas y entrenadas partiendo de la base de datos alcanzados por medio de múltiples inyecciones de sustancias por la invención y mediciones realizadas por el sensor de presión en el
20 recipiente de muestras. El adiestramiento supervisado de la red neuronal por medio de la base de datos permite que la IA sea capaz de realizar inyecciones y estimar la cantidad restante del volumen de las muestras antes, durante y después de cada inyección del sistema.
25

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

30 La invención propuesta está conformada por 4 secciones: 1) accionamiento de embolo, 2) indexadora y sensor de presión diferencial, 3) guillotina de posicionamiento, 4) válvula de inyección.

5 La figura 1 presenta una vista previa de todo el sistema conformado por sus cuatro bloques principales, siendo estos bloques denominados: bloque de accionamiento de embolo, bloque de indexadora y sensor de presión, bloque de posicionamiento de guillotina y bloque de válvula de inyección motorizada. El primer bloque consta de un motor nema 23 (1), mecanismo de husillo (2), tope y límite del mecanismo (3),

10 bloque de posicionamiento altura de jeringa (4), mecanismo sujeción de embolo de jeringa (5), mecanismo sujeción de jeringa (6), base de bloque de accionamiento de embolo y guillotina de posicionamiento (7), sensor de presión en indexadora (8), indexadora de posicionamiento de muestra (9), válvula de inyección motorizada (10), recipiente de muestra (11), caja de almacenamiento de tarjetas y circuitos (12).

15 La figura 2 hace referencia al bloque 1 denominado accionamiento de embolo, constituido por un motor nema 23 (1) para elevar el bloque del husillo (2), mecanismo de husillo (2) encargado de posicionar verticalmente el mecanismo de jeringa, límite del mecanismo (3) con sensor final de carrera para delimitar el rango de movimiento del dispositivo, bloque de guillotina (4A) acoplado al mecanismo de

20 husillo para posición y estabilidad, bloque elevador de guillotina (4B) acoplado a un actuador lineal (7) equipado con sensores final de carrera, mecanismo de sujeción y manipulación vertical de embolo (5) equipada de sensores para evitar dañar la cámara presurizada de la jeringa, mecanismo sujeción de jeringa (6) acoplada al bloque de mecanismo de husillo (2) ofrece firmeza al manipular el embolo de la

25 jeringa, actuador lineal de posicionamiento (7) responsable del desplazamiento vertical de los bloques de accionamiento de jeringa y guillotina de posicionamiento, acompañado de dos pilares para ofrecer estabilidad al desplazarse.

La figura 3 hace referencia al bloque 2 denominado bloque de indexadora y al bloque 4 denominado válvula de inyección, se encuentra conformado por un sensor de presión diferencial (8) acoplado al recipiente de la muestra (14), indexadora de

30 posiciones (9) fabricada en Nylamid acoplada a un motor nema 23 (16), perilla de carga de válvula de inyección motorizada (10A) fija al suelo del sistema con un sensor encargado de la alineación entre la válvula y la jeringa, boquilla de inyección (10B) acoplada al sistema de cromatografía líquida donde se carga la muestra

5 inyectada, base de válvula de inyección motorizada (11) equipada con un motor a
pasos para realizar la carga del analito de forma automática, encapsulado de placas
y circuitos (12) espacio de guardado y protección de placas, drivers, fuentes de
alimentación y circuitos acoplados al sistema, placa de encapsulado (13) permite
10 utilizar el mecanismo sin comprometer circuitos electrónicos, recipiente de analito
(14) recipiente acoplado a sensor de presión (8) para su monitoreo en tiempo real ,
motor nema 23 de posicionamiento (15) realiza la rotación y posicionamiento de las
muestras dependiendo de la distancia del mecanismo de inyección equipado con
un sensor de distancia.

La figura 4 hace referencia al bloque 3 denominado guillotina de posicionamiento,
15 el cual consta de un límite de desplazamiento (3) delimitando el rango del
mecanismo de elevación, un bloque de guillotina (4A) acoplado al bloque de husillo
de posición, bloque elevador de guillotina (4B) sirviendo de peso y estabilidad al
desplazar el mecanismo de jeringa, un actuador lineal (7) responsable del
posicionamiento del mecanismo de jeringa, perilla de carga de válvula de inyección
20 motorizada (10A) encargada de realizar la carga de la sustancia dentro del sistema
de cromatografía, boquilla de inyección (10B) acoplada al sistema de cromatografía
donde se carga la muestra inyectada, base de válvula de inyección motorizada (11)
equipada con un motor a pasos para realizar la carga del analito de forma
automática, base de mecanismo de posición (17) ofreciendo estabilidad al ser el
25 pivote del mecanismo, pilares de movimiento vertical (17) pilares de
posicionamiento vertical del sistema de inyección.

La figura 5 presenta el principio de funcionamiento del algoritmo de inteligencia
artificial, cuenta con vectores de entrada en la red neuronal (18) en donde se
realizará la captura de las variables a supervisar, cuenta con neuronas de entrada
30 (19) enfocada en la obtención de datos, seguidos de neuronas de capa intermedia
(20) acopladas a neuronas de salida (21), permitiendo entrenar la red neuronal con
cada inyección realizada, lo que permite a la invención propuesta el buscar patrones
entre los rangos de inyección con sustancias, estimación de inyecciones
disponibles, rangos habituales entre sustancias y una supervisión en tiempo real del

- 5 volumen de muestra disponible en el recipiente, ofreciendo una correcta repetibilidad entro de los análisis cromatográficos.

10

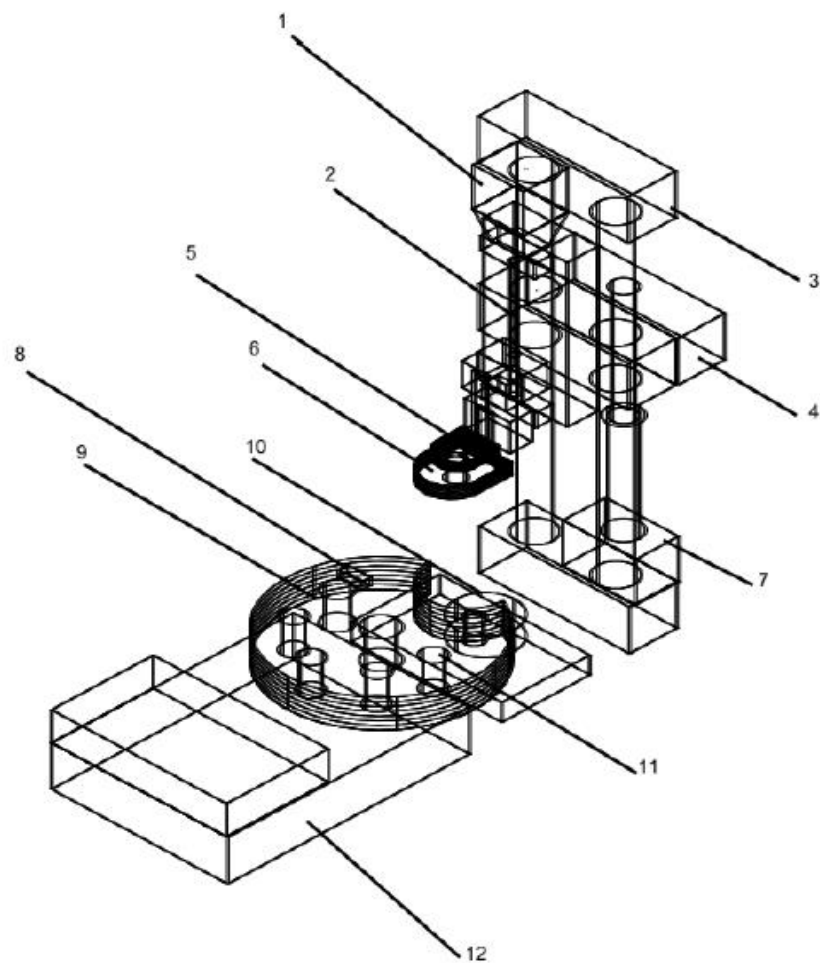
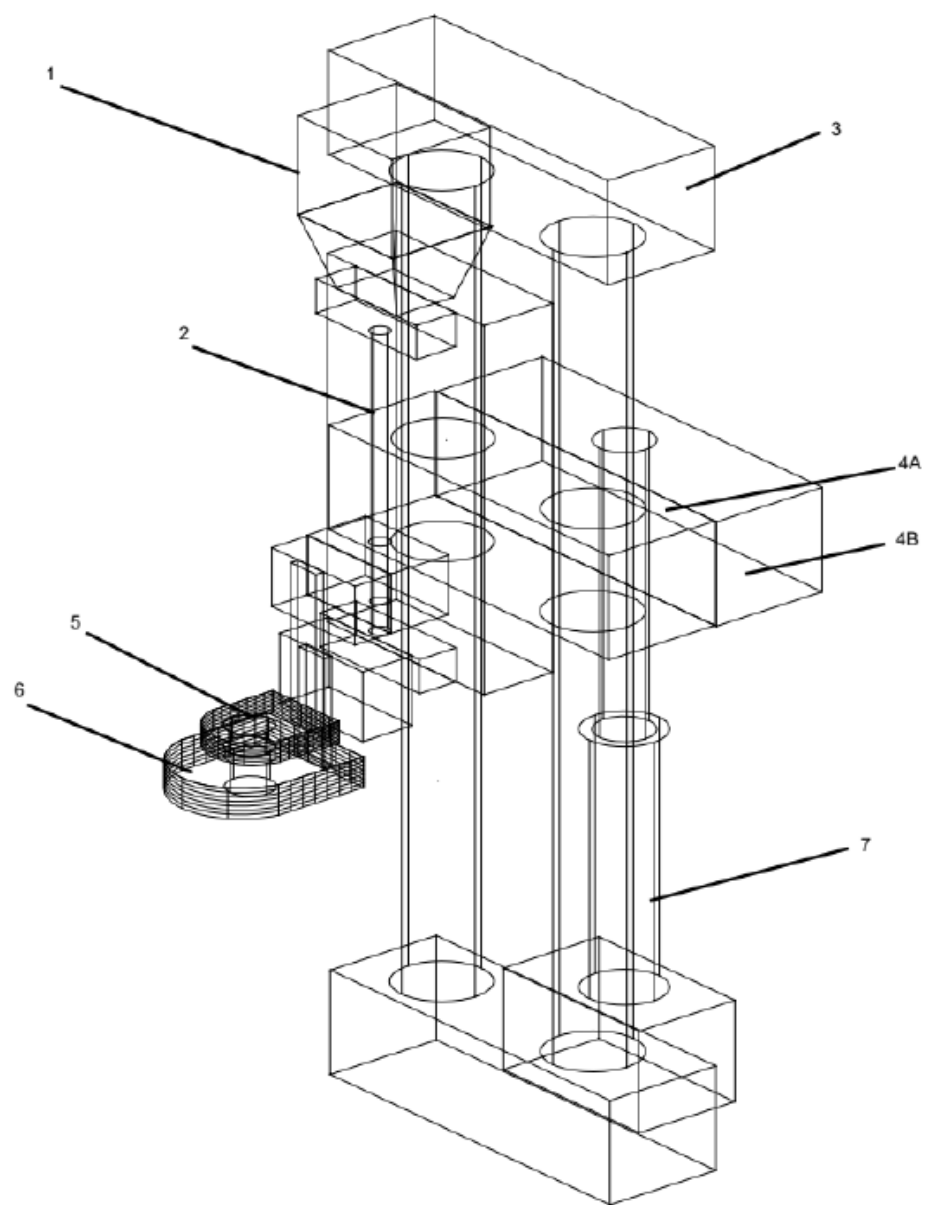
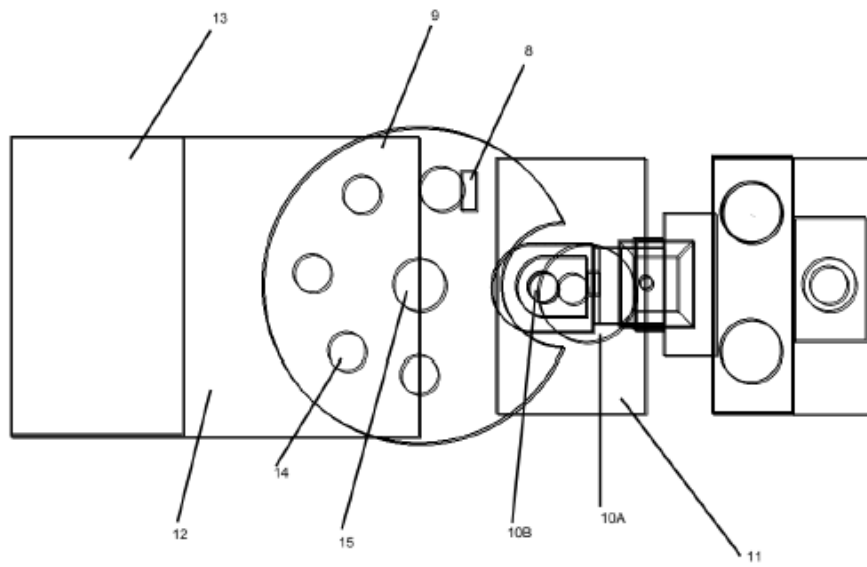


Figura 1



5

Figura 2



5

Figura 3

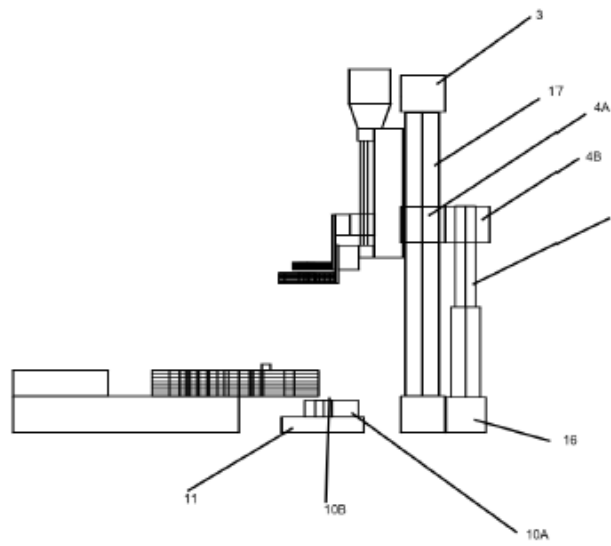


Figura 4

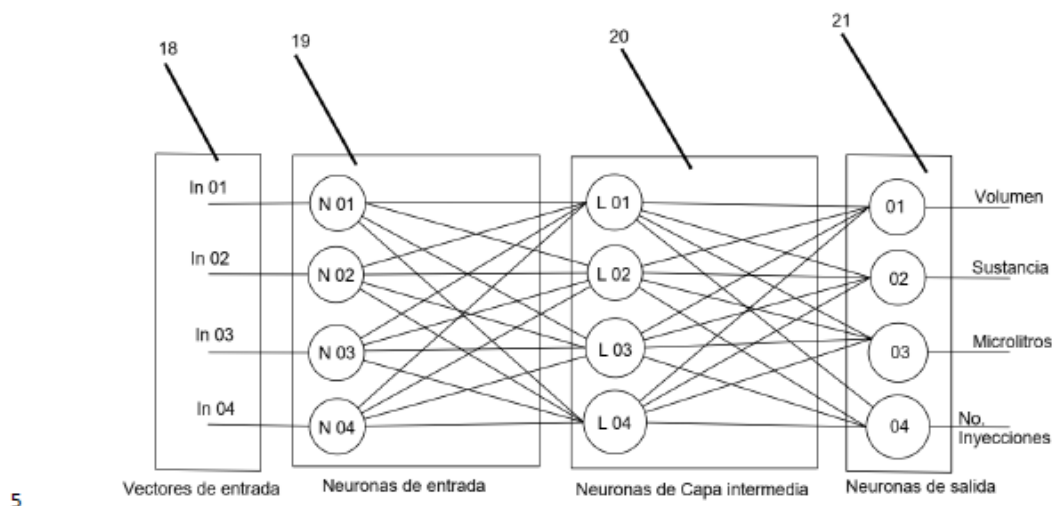


Figura 5

MEJOR MÉTODO PARA LLEVAR A CABO LA INVENCION

El bloque de accionamiento de embolo, tiene como objetivo desplazar en el eje vertical el embolo de la jeringa presurizada, considerando el rango de desplazamiento del embolo, evitando rupturas y despresurizaciones en la jeringa.

10 El mecanismo del embolo está conformado por un motor a pasos (1) ofreciendo precisión en el desplazamiento de bloque, una jeringa presurizada en el rango de 1 a 10 μ l ,un mecanismo de husillo con rieles metálicos (2) equipado con un sensor de distancia además de contar con piezas diseñadas y fabricadas a medida de la jeringa, el empleo de piezas a la medida permite al dispositivo suspender de manera

15 firme el cuerpo de la jeringa (6) mientras que el embolo de la jeringa se encuentre acoplado al bloque levadizo del husillo (5), permitiendo un accionamiento preciso y repetible de la jeringa en operación. Las piezas mencionadas se encontrarán atornilladas entre sí, ofreciendo solidez al bloque del dispositivo, las piezas metálicas fueron fabricadas en medida del bloque de guillotina para un acople

20 adecuado.

El bloque conformado por la indexadora y sensor de presión diferencial está constituido por un motor a pasos (15) atornillado a la caja de circuitos manteniendo fijo el motor, la caja de circuitos (13) está conformada por cuatro paredes de metal, resguardando de la intemperie todos los circuitos que regulan el sistema, tarjetas

25 de desarrollo y módulos, la indexadora de muestras (9) es un modelo diseñado en Solid Works y fabricado en Nylamid, la indexadora está diseñada para sujetar de forma ordenada los tubos de ensayo (14) que almacenaran las muestras, además de contar con espacio para instalar el sensor de presión diferencial (8) y sensores que servirán para alinear la posición de la indexadora con el bloque del posición de

30 la jeringa y la válvula de inyección motorizada, la válvula de inyección motorizada(10^a)(10B) se encuentra sujeta a la base del dispositivo (12)(11), cuenta con un sensor indicador de distancia que sirve como tope delimitando el avance vertical del bloque de guillotina de posicionamiento.

5 El bloque de guillotina de posicionamiento está formado por un actuador lineal (7) equipado con sensores de contacto que delimitan su rango de desplazamiento vertical, una barra metálica (3) que sirve de tope limitando el rango del actuador lineal, dos columnas de metal (17) que brindan soporte y estabilidad al bloque de posicionamiento vertical, el bloque móvil (4A)(4B) se compone de dos piezas
10 metálicas unidas equipadas con baleros que permiten un desplazamiento vertical sin causar fricción, el lado A del bloque de posicionamiento tiene acoplado el bloque de accionamiento de embolo, permitiendo desplazar la jeringa en tres posiciones: Inicio, extracción e inyección.

La red neuronal propuesta ha sido entrenada con múltiples pruebas de inyección de
15 sustancias, es un algoritmo de aprendizaje supervisado, lo que requiere de múltiples pruebas supervisadas para compilar información, permitiendo almacenar y buscar relaciones en futuras pruebas, así como realizar un monitoreo de volumen adecuado en tiempo real contemplando el tipo de sustancia, estimar el número de inyecciones y el rango de los micro litros programados a través de la interfaz.

20

REIVINDICACIONES

Una vez cubriendo la descripción detallada de la invención, es considerada una
novedad y es reclamada como exclusiva propiedad, lo considerado en los siguientes
25 apartados.

1. Un dispositivo para la manipulación e inyección de sustancias en volúmenes
pequeños en el rango de los microlitros con supervisión en tiempo real del
volumen en el recipiente de la muestra empleando inteligencia artificial, que
se conforma de:

30 a) Un mecanismo de accionamiento de embolo aplicado a la manipulación de jeringas presurizadas, conformado por una guía motorizada y piezas diseñadas en Nylamid para el soporte de la

- 5 jeringa, para realizar extracciones e inyecciones de sustancias en el rango de los microlitros sin comprometer la calidad de la muestra.
- b) Una red neuronal constituida de capas de entrada, neuronas intermedias y neuronas de salida, configurada para supervisar, administrar y notificar sobre el volumen de la sustancia disponible en tiempo real del recipiente de muestras, estimar futuras inyecciones disponibles y el rango habitual de inyección en relación del tipo de sustancia.
- 10 c) Indexadora de sustancias, conformada por una pieza diseñada y fabricada en Nylamid, un motor a pasos, tubos de ensayo de vidrio y sensores de presión diferencial para calcular el volumen en cada recipiente disponible en el plato de muestras.
- 15 d) Válvula de inyección motorizada y un sensor para alinearse verticalmente con el mecanismo de accionamiento de embolo, permitiendo cargar la muestra depositada en la válvula de forma inmediata sin sufrir despresurizaciones dentro del sistema de cromatografía líquida al que la invención se encuentre acoplado.
- 20

RESUMEN DE LA INVENCION

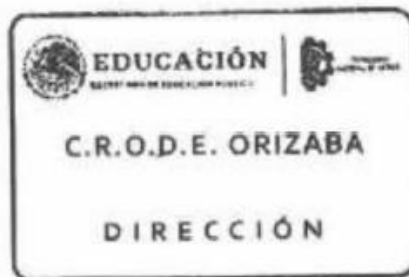
- 25 La presente invención hace mención a un dispositivo de extracción e inyección automática para la manipulación de sustancias en el orden de los microlitros mediante técnicas de cromatografía líquida, empleando algoritmos de inteligencia artificial para un monitoreo en tiempo real el volumen disponible en el recipiente de muestras, permitiendo estimar futuras inyecciones disponibles en relación al volumen restante, rangos de inyección en relación a la sustancia a analizar, notificaciones de estado de cada proceso el sistema, ofreciendo precisión y repetibilidad en cada inyección, por medio de una interfaz gráfica encargada de notificar cada proceso del sistema.
- 30

Orizaba, Ver a **01/noviembre/2023**
Oficio No. DIR/096/2023**A QUIEN CORRESPONDA
PRESENTE**

Por este medio se hace constar que este Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo de Orizaba, recibió en comodato, el día 1 de noviembre de 2023, la invención titulada: "SISTEMA DE EXTRACCIÓN E INYECCIÓN AUTOMATIZADO CON SUPERVISIÓN EN TIEMPO REAL BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL", la cual se encuentra en trámite de registro de Modelo de Utilidad ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial, a través del Centro de Patentamiento de este Centro, la cual fue diseñada y construida por los Investigadores del Tecnológico Nacional de México: Albino Martínez Sibaja, Angélica Mara Bello Ramírez, Arturo Alvarado Lassmann, José Pastor Rodríguez Jarquín, Norma Alejandra Vallejo Cantú, Ofelia Landeta Escamilla, Rubén Posada Gómez y Aramis Tinoco Díaz.

Esta invención consiste en un dispositivo de extracción e inyección automática para la manipulación de sustancias en el orden de los microlitros mediante técnicas de cromatografía líquida, empleando algoritmos de inteligencia artificial para un monitoreo en tiempo real el volumen disponible en el recipiente de muestras, permitiendo estimar futuras inyecciones disponibles en relación al volumen restante, rangos de inyección en relación a la sustancia a analizar, notificaciones de estado de cada proceso el sistema, ofreciendo precisión y repetibilidad en cada inyección, por medio de una interfaz gráfica encargada de notificar cada proceso del sistema.

Actualmente se está evaluando el potencial de explotación comercial de esta invención en este Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo de Orizaba.

ATENTAMENTE*Excelencia en Educación Tecnológica
Por el fortalecimiento de la educación***DR. RUBEN POSADA GÓMEZ**
DIRECTORccp. Archivo
RPG / MMRProlongación de la Calle 2 S/N Col. Agrícola Librado Rivera. C.P.94380
Tel. (272) 7252464 y (272) 7256755 tecnm.mx | dir_crodeorizaba@tecnm.mx

CAPITULO 1. ANTECEDENTES

La cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) se ha consolidado como una técnica analítica robusta y aceptada en la comunidad científica. Su uso se ha extendido a diversas industrias y áreas de investigación debido a su capacidad para separar y cuantificar compuestos con buena repetibilidad, lo que permite verificar propiedades fisicoquímicas, asegurar el cumplimiento de especificaciones y respaldar estudios científicos.

Si se pone atención en el sistema de detección de un HPLC, particularmente cuando se emplea un detector en la región ultravioleta-visible (UV/Vis), se observa que la mayoría de los equipos comerciales continúan utilizando esquemas de procesamiento de señal relativamente convencionales. En general, estos sistemas no incorporan de forma explícita técnicas de inteligencia artificial para apoyar la optimización de las condiciones de trabajo ni para extraer información adicional de las señales generadas. Esto abre la posibilidad de explorar detectores UV/Vis que integren algoritmos avanzados de análisis de datos para mejorar tanto la adquisición como la interpretación de los cromatogramas.

En la literatura y en el estado del arte se han identificado desarrollos donde se combinan métodos espectroscópicos con modelos de inteligencia artificial. Un ejemplo de ello es la patente mexicana MX 399884 B, en la que se describe un dispositivo portátil para estimar la conductividad eléctrica del suelo y las concentraciones de K, Ca, Mg y Na. En dicho sistema se utilizan sensores capacitivos junto con técnicas de espectroscopía y redes neuronales artificiales supervisadas, con el objetivo de inferir las propiedades de interés a partir de mediciones indirectas. [1]

De manera similar, la solicitud de patente MX/a/2020/010504 aborda el control de calidad de polímeros, en particular poliolefinas, mediante la combinación de espectroscopía Raman y métodos de aprendizaje automático. En este caso, se emplean modelos de inteligencia artificial para relacionar los espectros obtenidos con características estructurales y

propiedades de los materiales, lo que permite evaluar su calidad sin recurrir a procedimientos destructivos o más complejos. [2]

Otro ejemplo relevante es la solicitud MX/a/2019/002505, en la que se propone un sistema no invasivo para evaluar la concentración de glucosa en sangre. En esta invención se proyecta un haz de luz en la región visible sobre la uña de un dedo, y la señal transmitida es registrada por un conjunto de sensores fotosensibles. A partir de las imágenes obtenidas y del procesamiento de la información (por ejemplo, análisis de histogramas de color y modelos multivariados lineales o no lineales), se estima la concentración de glucosa utilizando técnicas que incluyen redes neuronales artificiales. [3]

Estos antecedentes muestran que existe un interés creciente en aprovechar la combinación de espectroscopía y algoritmos de inteligencia artificial para estimar parámetros de interés en diferentes contextos (suelos, polímeros, glucosa en sangre, entre otros). Sin embargo, a pesar de estos avances, no se han encontrado reportes que describan un sistema de detección UV/Vis específicamente diseñado para integrarse a un equipo de cromatografía líquida y que, al mismo tiempo, incorpore de manera directa modelos de inteligencia artificial para apoyar la interpretación de los cromatogramas y la selección de condiciones de separación.

Por lo anterior, el presente trabajo de tesis plantea el desarrollo de un sistema de detección UV/Vis que incorpore algoritmos de inteligencia artificial, orientado a la identificación de compuestos orgánicos con grupos cromóforos y a la mejora del análisis cromatográfico. La intención es utilizar técnicas de optimización y aprendizaje automático para ajustar parámetros relevantes de la separación —como la elección de disolvente, la composición de la fase móvil, la temperatura o el gasto de flujo— de forma que se logre una separación adecuada y se incremente la confiabilidad de los resultados. Además, se busca que este sistema pueda implementarse en instituciones educativas y centros de investigación, ofreciendo una alternativa accesible para realizar estudios de alta calidad sin depender exclusivamente de equipos comerciales de alto costo.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Cromatografía

La cromatografía es una técnica de separación en la que una mezcla se pone en contacto con dos fases distintas: una que permanece fija y otra que se desplaza. La fase estacionaria puede consistir en un sólido o en un líquido soportado sobre un sólido, mientras que la fase móvil suele ser un líquido o un gas que fluye a través del sistema. Cada componente de la mezcla interacciona de manera diferente con ambas fases, por lo que avanza a distinta velocidad a lo largo del dispositivo cromatográfico; esta diferencia en las afinidades es la que permite lograr la separación de las especies presentes en la muestra. [4]

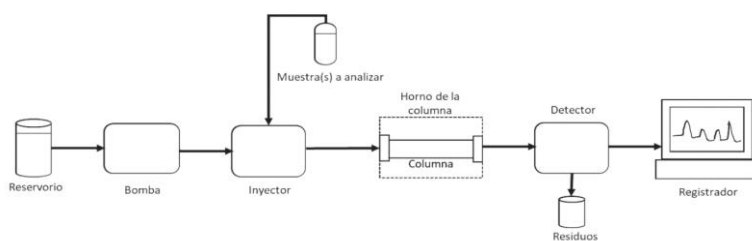


Figura 1. Diagrama de componentes en un sistema de HPLC.[4]

Cromatografía líquida

En la cromatografía líquida, la fase móvil está formada por uno o varios disolventes que circulan a través de un medio estacionario. Esta fase estacionaria puede consistir en un sólido con diferente afinidad por cada soluto (cromatografía líquido–sólido) o en un líquido retenido sobre un soporte sólido, de manera que los analitos se reparten entre ambas fases (cromatografía líquido–líquido). [4]

Cromatografía de intercambio iónico

La cromatografía de intercambio iónico es una modalidad de cromatografía en fase líquida utilizada para separar especies cargadas, tanto orgánicas como inorgánicas. En este tipo de técnica se emplean materiales sólidos que poseen grupos funcionales iónicos, como resinas, geles o derivados de celulosa, los cuales pueden intercambiar iones con los presentes en la fase móvil y así lograr la separación en función de su carga y afinidad por el intercambiador. [4]

Cromatografía de exclusión molecular

La cromatografía de exclusión molecular, también conocida como cromatografía por exclusión de tamaño, emplea columnas rellenas con un material polimérico que contiene poros de dimensiones controladas. Las moléculas de menor tamaño pueden entrar en dichos poros y, por lo tanto, recorren un camino más largo dentro de la columna, mientras que las especies más grandes quedan parcialmente excluidas y eluyen primero. De esta manera, la separación se consigue principalmente en función del tamaño hidrodinámico de las moléculas presentes en la muestra. [5]

Cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC)

En la cromatografía líquida de alta eficiencia se utilizan partículas muy finas en la fase estacionaria, con diámetros del orden de unas cuantas micras. Esto provoca una elevada resistencia al paso del líquido a través de la columna, por lo que es indispensable emplear bombas de alta presión para impulsar el eluyente a un caudal controlado. [4]

De forma general, un sistema HPLC está integrado por los elementos siguientes:

- Uno o varios recipientes que contienen los disolventes que conforman la fase móvil.
- Una bomba encargada de impulsar dicha fase móvil a la presión requerida.

- Un dispositivo para introducir la muestra en el flujo, comúnmente una válvula de inyección de volumen fijo.
- La columna cromatográfica, donde tiene lugar la separación de los distintos compuestos en función de su interacción con la fase estacionaria.
- Un sistema de control de temperatura para la columna, cuando el método lo requiere.
- Uno o más detectores, que convierten la señal de salida en una respuesta eléctrica registrable. [5]

Los disolventes utilizados como fase móvil deben ser de alta pureza (grado HPLC) para evitar la presencia de impurezas que puedan obstruir la columna o generar señales de fondo indeseables. De igual manera, los detectores empleados han de presentar buena sensibilidad y selectividad, de modo que la señal eléctrica obtenida sea representativa de la cantidad de analito que eluye de la columna.

Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA) es una rama de la informática que se ocupa de diseñar sistemas capaces de resolver tareas que, tradicionalmente, requieren algún tipo de “inteligencia” por parte de una persona, como reconocer patrones, tomar decisiones o hacer predicciones a partir de datos disponibles. En lugar de programar de forma explícita cada posible situación, se busca que el sistema pueda adaptar su comportamiento a distintos escenarios. [6]

En muchos de estos sistemas, el enfoque principal consiste en aprovechar la información contenida en grandes conjuntos de datos y procesarla mediante modelos matemáticos y algoritmos específicos. A través de ciclos de entrenamiento y prueba, los modelos son capaces de detectar regularidades, construir representaciones internas útiles y ajustar sus parámetros para mejorar su desempeño conforme reciben más ejemplos. [7]

Dentro del campo de la IA se distinguen varios enfoques, entre los cuales destacan el aprendizaje automático (machine learning) y el aprendizaje profundo (deep learning). En el aprendizaje automático, los algoritmos utilizan datos de entrada y ejemplos conocidos para inferir reglas o funciones que permitan clasificar, predecir valores o tomar decisiones en nuevos casos. El aprendizaje profundo, por su parte, emplea arquitecturas formadas por múltiples capas de neuronas artificiales, capaces de extraer representaciones de mayor nivel a partir de los datos originales, lo que resulta especialmente útil en problemas complejos como el análisis de imágenes, audio o señales espectrales. [8]

La inteligencia artificial se ha incorporado progresivamente a numerosos ámbitos de aplicación, entre ellos la salud, el transporte, la agricultura, la manufactura, la robótica y los servicios digitales. En el área médica, por ejemplo, se emplean modelos de IA para apoyar el diagnóstico, analizar imágenes clínicas, proponer combinaciones de fármacos y ajustar terapias en función de las características de cada paciente. En el sector automotriz, se utilizan algoritmos para supervisar el entorno del vehículo, asistir al conductor y servir como base para el desarrollo de sistemas de conducción automatizada. [7]

No obstante, el uso extendido de estas tecnologías también genera interrogantes importantes. Entre ellas se encuentran el manejo responsable de la información que se recopila, los criterios que siguen los algoritmos al tomar decisiones y las posibles repercusiones sobre el mercado laboral. Por ello, al diseñar y aplicar soluciones basadas en IA es necesario considerar no solo el rendimiento técnico, sino también sus consecuencias sociales y éticas. [7]

En síntesis, la inteligencia artificial puede entenderse como un conjunto de métodos orientados a incorporar cierto grado de “capacidad cognitiva” en sistemas computacionales, de modo que puedan aprender a partir de datos y responder de forma flexible a diferentes situaciones. Mediante enfoques de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, la IA es capaz de construir modelos que apoyan la toma de decisiones en múltiples contextos. Esto

ofrece oportunidades significativas de mejora en diversos sectores, pero al mismo tiempo plantea retos que deben atenderse conforme la tecnología continúa avanzando. [7]

Técnicas de inteligencia artificial

En el ámbito de la inteligencia artificial se han desarrollado diversas técnicas para abordar problemas de clasificación, predicción, optimización y toma de decisiones. A continuación se describen algunas de las más utilizadas. [9]

- **Aprendizaje automático (*machine learning*)**

Se refiere a un conjunto de métodos que construyen modelos a partir de datos de ejemplo. En lugar de programar explícitamente todas las reglas, el algoritmo ajusta sus parámetros para capturar las relaciones existentes entre las variables de entrada y la respuesta deseada. De forma general, se distinguen tres grandes familias: aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado y aprendizaje por refuerzo.

- **Aprendizaje supervisado**

En este enfoque, el modelo se entrena con ejemplos para los cuales se conocen tanto las entradas como la salida o etiqueta asociada. A partir de estos pares entrada-salida, el algoritmo aprende una función que permite predecir la respuesta para nuevos datos. Un caso típico es la construcción de modelos capaces de asignar una clase a cada muestra o estimar un valor continuo a partir de mediciones experimentales.

- **Aprendizaje no supervisado**

Aquí únicamente se dispone de las variables de entrada, sin etiquetas que indiquen una respuesta deseada. El objetivo es descubrir estructura en los datos, por ejemplo agrupando muestras similares entre sí o identificando patrones recurrentes. Entre las

técnicas más empleadas se encuentran los algoritmos de agrupamiento (*clustering*) y los métodos de reducción de dimensionalidad.

- **Aprendizaje por refuerzo**

En este esquema se considera un agente que interactúa con un entorno: realiza acciones y recibe señales de evaluación (recompensas o penalizaciones) según el resultado obtenido. A partir de esa retroalimentación, el agente ajusta su política de actuación con la finalidad de maximizar la recompensa acumulada en el tiempo. Este tipo de aprendizaje se ha aplicado en control, robótica y juegos, entre otros campos.

- **Aprendizaje profundo (*deep learning*)**

Es una rama del aprendizaje automático que utiliza redes neuronales con múltiples capas para construir representaciones jerárquicas de los datos. Estas arquitecturas permiten extraer características de alto nivel a partir de información bruta, lo que las hace especialmente eficaces en problemas complejos como el reconocimiento de patrones en imágenes, secuencias de audio, texto o señales multivariadas.

- **Lógica difusa (*fuzzy logic*)**

La lógica difusa proporciona un marco para tratar conceptos imprecisos o graduales, permitiendo grados de pertenencia entre 0 y 1 en lugar de valores exclusivamente verdaderos o falsos. Esto resulta útil cuando se desea modelar términos lingüísticos como “bajo”, “medio” o “alto”. Se aplica con frecuencia en sistemas de control, apoyo a la decisión y desarrollo de sistemas basados en reglas.

- **Algoritmos genéticos**

Son técnicas de búsqueda y optimización inspiradas en los principios de la evolución biológica. Trabajan con una población de posibles soluciones que se combinan y

modifican mediante operadores análogos a la selección, el cruce y la mutación. Con el paso de las generaciones, la población tiende a concentrarse en regiones del espacio de búsqueda con soluciones de mejor calidad.

- **Sistemas expertos**

Los sistemas expertos se basan en una base de conocimiento que recoge la experiencia de especialistas en un dominio particular (por ejemplo, mediante reglas del tipo “si... entonces...”), junto con un motor de inferencia encargado de aplicar dichas reglas a los datos disponibles. Su propósito es emular el razonamiento de un experto humano para apoyar tareas de diagnóstico, asesoría o resolución de problemas complejos en áreas como la medicina, el derecho o la ingeniería. [9]

Tipos de detectores en cromatografía líquida

En un sistema de cromatografía líquida, el detector es el módulo encargado de registrar la salida de los compuestos que han sido separados en la columna. Su función es transformar alguna propiedad fisicoquímica de la fase móvil o de los analitos (por ejemplo, absorbancia, fluorescencia o conductividad) en una señal eléctrica que varía con el tiempo y que pueda relacionarse con la concentración de cada componente. Un detector considerado “adecuado” para un método cromatográfico debe ofrecer, en la medida de lo posible, alta sensibilidad, buena estabilidad, registro continuo de la señal y una respuesta apropiada para el tipo de muestra que se analiza. [10]

Al seleccionar un detector para una aplicación específica, es importante considerar algunas características generales:

- **Respuesta**

Puede describirse como **universal** cuando el detector responde, al menos en cierta

medida, a una amplia variedad de compuestos, o **selectiva** cuando es sensible únicamente a familias de analitos con propiedades particulares. Los detectores universales son útiles para el análisis global de mezclas, mientras que los detectores selectivos, que suelen ser más sensibles, resultan ventajosos cuando se requiere determinar trazas de ciertos compuestos en matrices complejas.

- **Sensibilidad**

La sensibilidad expresa qué tan grande es la señal generada por unidad de cantidad de analito. En la práctica, se refiere a la capacidad del detector para registrar cambios pequeños en la concentración. Es un parámetro relativo, ya que un mismo detector puede mostrar respuestas distintas según el tipo de sustancia que se esté midiendo. [10]

- **Ruido**

Se entiende por ruido a las fluctuaciones de la señal que no provienen de la muestra, sino de fuentes externas o internas al instrumento, como variaciones electrónicas, cambios en el flujo o la temperatura, inestabilidad en la fuente de luz, burbujas presentes en la celda de medida, entre otros factores. Un nivel de ruido elevado limita la detección de bajas concentraciones, ya que oculta las señales de menor intensidad.

- **Linealidad**

Para que la señal del detector pueda utilizarse con fines cuantitativos, es deseable que exista una relación aproximadamente lineal entre la respuesta obtenida y la concentración del analito en un cierto intervalo de trabajo. El rango lineal se define como el conjunto de concentraciones dentro del cual esta relación se mantiene, de modo que duplicar la cantidad de analito implique, de forma aproximada, duplicar la señal.

- **Estabilidad**

Un buen detector debe mantener su línea base lo más constante posible con el tiempo, sin desviaciones significativas debidas a cambios en el flujo, en la temperatura o en las condiciones de la fase móvil (por ejemplo, en gradientes de elución). Una línea

base estable facilita la integración de los picos y mejora la precisión en la cuantificación. [10]

Tipos de detectores

Detector de índice de refracción

El detector de índice de refracción mide la diferencia entre el índice de refracción de la fase móvil pura y el de la solución que contiene a los analitos. Es decir, responde a cambios globales en una propiedad de la disolución debidos a la presencia de solutos. Por este motivo se considera prácticamente universal y, además, no destruye la muestra. Sin embargo, su sensibilidad es limitada y la señal se ve fuertemente afectada por pequeñas variaciones de temperatura. Otro inconveniente importante es que no resulta adecuado para elución en gradiente, ya que cualquier cambio en la composición de la fase móvil modifica también su índice de refracción y dificulta la obtención de una línea base estable. [11]

Detector UV

El detector basado en absorción ultravioleta es el más empleado en cromatografía líquida de alta eficiencia. A diferencia del detector de índice de refracción, en este caso la respuesta se asocia principalmente a una propiedad del soluto: su capacidad de absorber radiación en el intervalo UV, mientras que la fase móvil suele presentar poca o nula absorción en la longitud de onda seleccionada. Se trata de un detector con buena sensibilidad y un rango lineal amplio, capaz de registrar cantidades del orden de nanogramos, no destructivo y compatible con el uso de gradientes. Además, su señal es relativamente poco sensible a cambios moderados de flujo o de temperatura. [11]

Dentro de esta familia se distinguen varios diseños:

- **Detectores de longitud de onda fija**, que operan a una longitud de onda predeterminada (por ejemplo, 254 nm), aunque existen equipos configurados para otras longitudes de onda específicas.
- **Detectores de longitud de onda variable o espectrofotométricos**, que incorporan un sistema óptico similar al de un espectrofotómetro convencional, pero con una celda de flujo en lugar de cubetas. Permiten seleccionar de manera flexible la longitud de onda de trabajo y, en versiones más modernas, registrar simultáneamente varias longitudes de onda.
- **Detectores de arreglo de fotodiodos (PDA)**, en los que la celda se ilumina con un haz policromático y la luz transmitida se dispersa mediante un elemento óptico (como una red de difracción) sobre una matriz de fotodiodos de silicio. Esto hace posible obtener, en cada instante de tiempo, el espectro completo de absorción del efluente, generando información tridimensional (tiempo–longitud de onda–absorbancia) que resulta muy útil para evaluar la pureza de los picos y optimizar las condiciones del método. El manejo de estos datos requiere del apoyo de una computadora y software especializado, por lo que este tipo de detector es especialmente valioso en el desarrollo de métodos analíticos. [11]

Detector de fluorescencia

Los detectores de fluorescencia se utilizan cuando los analitos presentan fluorescencia intrínseca o cuando se someten a una reacción de derivatización con un reactivo fluorogénico. Su principal ventaja es la combinación de una sensibilidad muy elevada con una alta selectividad, lo que los hace especialmente adecuados para el análisis de trazas. La selectividad se debe a que no todas las moléculas son fluorescentes y a que las reacciones de derivatización exigen la presencia de grupos funcionales específicos. La emisión se registra habitualmente mediante un elemento fotoeléctrico colocado en una dirección aproximadamente perpendicular respecto al haz de excitación. [11]

Detector electroquímico

Los detectores electroquímicos ofrecen, para especies electroactivas, sensibilidades superiores a las de muchos detectores UV y, al mismo tiempo, una excelente selectividad. Solo responden a compuestos capaces de sufrir procesos de oxidación o reducción en el electrodo de trabajo, y es posible ajustar el potencial aplicado para limitar aún más el conjunto de analitos que generan señal. Dependiendo del modo de operación, estos detectores pueden basarse en técnicas como la amperometría, la voltamperometría, la coulombimetría o la conductimetría, todas ellas consideradas dentro de los métodos electroanalíticos empleados en cromatografía líquida. [11]

Detector UV-VIS

Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta (UV) forma parte del espectro electromagnético y corresponde, de manera aproximada, al intervalo de longitudes de onda entre 100 nm y 400 nm. Esta región se ubica por encima de los rayos X de baja energía y por debajo de la luz visible. [12]

Por conveniencia, la zona UV suele subdividirse en tres bandas principales:

- **UV-A:** desde 320 nm hasta 400 nm.
- **UV-B:** de 280 nm a 320 nm.
- **UV-C:** longitudes de onda menores a 280 nm.

Cada una de estas bandas presenta particularidades en cuanto a su interacción con la materia y sus aplicaciones tecnológicas.

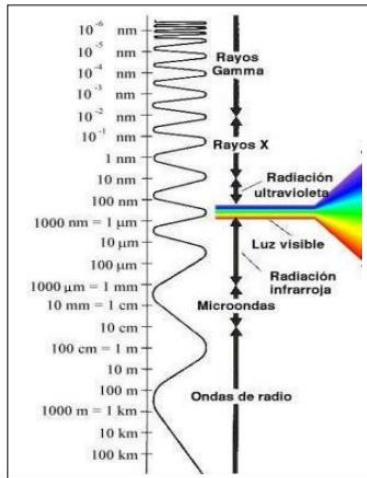


Figura 2. Espectro y longitudes de onda.[13]

Sistemas de detección en la región ultravioleta

Los sistemas de medida en la región UV pueden basarse en distintos principios físicos. De forma general, se distinguen **detectores térmicos**, que responden al incremento de temperatura causado por la radiación incidente, y **fotodetectores**, que convierten directamente la energía luminosa en una señal eléctrica. [14]

Detectores térmicos

En los detectores térmicos, la radiación que llega al dispositivo se transforma en calor, produciendo un cambio de temperatura en el material sensor. Este cambio se traduce en una variación de alguna magnitud medible (por ejemplo, resistencia eléctrica), que es la que finalmente se registra. Entre los detectores de este tipo se encuentran:

- **Bolómetros**

Un bolómetro consiste, en términos sencillos, en un elemento absorbente de radiación unido térmicamente a un cuerpo que actúa como disipador de calor, ambos conectados mediante un material cuya resistencia depende de la temperatura. La

potencia óptica absorbida eleva la temperatura del elemento sensible respecto a la del disipador, y la diferencia de temperatura se refleja en una variación de resistencia que puede medirse mediante un circuito apropiado. Estos dispositivos se emplean sobre todo en la región infrarroja y, en menor medida, en el visible. [14,15]

- **Pirómetros**

El pirómetro es un instrumento diseñado para estimar la temperatura de una superficie a partir de la radiación térmica que emite, sin necesidad de contacto físico con el objeto. En este tipo de aparato se compara la radiación proveniente del objeto de interés con la emitida por una fuente interna (por ejemplo, una lámpara incandescente a la que se ajusta la intensidad). Cuando ambas radiaciones resultan equivalentes, la corriente que alimenta la lámpara se relaciona con la temperatura del objeto mediante una calibración adecuada. [16,17]

Aunque estos detectores se utilizan con mayor frecuencia en la región infrarroja, los principios en los que se basan son útiles para comprender distintos esquemas de detección radiométrica.

Fotodetectores

Un fotodetector actúa como un transductor óptico-eléctrico: la luz incidente en su superficie activa produce una señal eléctrica (tensión o corriente) relacionada con la potencia luminosa recibida. De manera general, pueden agruparse en dos grandes familias: **fotográficos** y **fotoeléctricos**. [18,19]

- **Fotodetectores fotográficos**

En este caso, la radiación produce cambios químicos en un material fotosensible (como una emulsión fotográfica), lo que permite registrar imágenes o patrones de luz. Su principal ventaja es la capacidad de almacenamiento de la información óptica; sin embargo, la sensibilidad suele ser menor y la respuesta no es inmediata, por lo que su

uso en instrumentación moderna ha sido ampliamente sustituido por detectores electrónicos. [18]

- **Fotodetectores fotoeléctricos**

Estos dispositivos generan directamente una señal eléctrica al recibir radiación. Presentan, en general, mejor linealidad y mayor sensibilidad que los detectores fotográficos, además de ofrecer una respuesta mucho más rápida. Dentro de este grupo se incluyen distintos tipos de dispositivos: [19]

- **Fotoemisivos:** basados en la emisión de electrones desde una superficie cuando es iluminada, usualmente en condiciones de vacío. Este principio se utiliza en fotomultiplicadores y tubos fotoemisores.
- **Semiconductores fotovoltaicos:** se trata, típicamente, de uniones p-n en las que la luz incidente genera pares electrón–hueco que dan lugar a una diferencia de potencial o a una corriente sin necesidad de polarización externa (principio empleado en celdas solares y fotodiodos fotovoltaicos).
- **Semiconductores fotoconductivos:** en estos materiales, la conductividad eléctrica cambia cuando son iluminados; la resistencia disminuye al aumentar la intensidad de la luz. Este comportamiento permite utilizarlos como sensores de iluminación o como elementos activos en ciertos arreglos de detección. [20]

Estos fotodetectores, especialmente los dispositivos semiconductores y los fotoemisivos, constituyen la base de muchos detectores UV-Vis empleados en espectroscopía y cromatografía, ya que permiten convertir la absorción de radiación por parte de los analitos en señales eléctricas adecuadas para su adquisición y procesamiento.

Detector UV-Vis empleado en este trabajo

En el presente proyecto se utiliza un detector UV-Vis de celda de flujo acoplado a un sistema de cromatografía líquida. Este tipo de detector está diseñado para registrar la absorción de radiación ultravioleta y visible por parte de los analitos a medida que el efluente abandona la columna, generando una señal proporcional a la cantidad de especie absorbente que pasa por la celda en cada instante.

El detector cuenta con una fuente de luz que cubre el intervalo espectral de interés (típicamente una lámpara de deuterio para la región ultravioleta y, en algunos modelos, una lámpara de tungsteno-halógeno para el rango visible), así como con un sistema óptico que dirige el haz a través de la celda de flujo. La luz transmitida es recogida por un fotodetector (por ejemplo, un fotodiodo o un fotomultiplicador), cuyo output se convierte en una señal eléctrica continua. Esta señal se registra como función del tiempo, dando lugar al cromatograma.

En la configuración utilizada en este trabajo, el detector permite seleccionar la longitud de onda de operación dentro de una ventana comprendida aproximadamente entre 190 y 400 nm, lo que resulta adecuado para el análisis de compuestos orgánicos con grupos cromóforos. La elección de la longitud de onda se realiza considerando el máximo de absorción característico de las especies presentes en la muestra, con el fin de maximizar la sensibilidad y mejorar la relación señal-ruido.

La salida analógica del detector se conduce a una etapa de adquisición de datos, donde la señal es digitalizada con una frecuencia de muestreo suficiente para describir adecuadamente la forma de los picos cromatográficos. Los datos digitales obtenidos se utilizan posteriormente como entrada de los modelos de inteligencia artificial desarrollados en este estudio, los cuales se encargan de procesar la información del cromatograma para tareas de identificación y cuantificación de los analitos.

De esta manera, el detector UV-Vis cumple una doble función dentro del sistema propuesto: por un lado, actúa como elemento clásico de medida en un sistema HPLC; por otro, proporciona las series de datos que alimentan a los algoritmos de redes neuronales, estableciendo el vínculo entre la instrumentación analítica y la etapa de procesamiento inteligente de la información.

RASPBERRY PI

La Raspberry Pi es una familia de computadoras de placa única (SBC, por sus siglas en inglés) desarrollada por la Raspberry Pi Foundation. Se trata de dispositivos de muy bajo consumo y tamaño reducido que integran en una sola tarjeta el procesador, la memoria y las interfaces de entrada/salida necesarias para ejecutar un sistema operativo completo. [21]

Algunas características relevantes para este trabajo son las siguientes: [21,22]

1. Dimensiones reducidas

El formato de placa única y las dimensiones físicas pequeñas permiten incorporar la Raspberry Pi directamente en prototipos o equipos de laboratorio donde el espacio disponible es limitado.

2. Bajo costo

El precio de estas tarjetas es considerablemente menor que el de muchas computadoras convencionales, lo que favorece su uso en proyectos educativos, de investigación y desarrollo de dispositivos especializados sin incrementar demasiado el presupuesto.

3. Hardware flexible

A pesar de su sencillez, la Raspberry Pi ofrece puertos y recursos suficientes para aplicaciones avanzadas: dispone de conectores USB y HDMI, interfaz para tarjeta microSD (donde se almacena el sistema operativo y los datos), así como un conjunto de pines de propósito general (GPIO) que permiten interactuar con sensores, actuadores y otros módulos electrónicos externos.

4. Comunidad de usuarios

Alrededor de la plataforma existe un ecosistema muy amplio de usuarios y desarrolladores. Esto se traduce en documentación, ejemplos de código, tutoriales y proyectos disponibles en línea, que facilitan la resolución de problemas y la reutilización de soluciones ya probadas.

5. Sistema operativo basado en Linux

Habitualmente se utiliza una distribución de Linux adaptada a la Raspberry Pi (como Raspberry Pi OS), lo que permite acceder a un entorno de desarrollo completo, ejecutar software de código abierto y emplear herramientas ya consolidadas para programación, comunicación con periféricos y procesamiento de datos.

6. Uso en educación y proyectos DIY

Gracias a su costo reducido y a la facilidad para trabajar con ella, la Raspberry Pi se utiliza con frecuencia para introducir conceptos de programación, electrónica y sistemas embebidos, y también como plataforma central en proyectos de tipo “hazlo tú mismo”, como servidores caseros, sistemas de monitoreo, automatización y prototipos de instrumentación científica. [22]

En el contexto de esta tesis, la Raspberry Pi se aprovecha como unidad de procesamiento principal para recibir, almacenar y analizar las señales generadas por el sistema de detección UV-Vis, así como para implementar los modelos de inteligencia artificial empleados en el tratamiento de los datos cromatográficos.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA (NOMBRE OPCIONAL)

3.1 Enfoque y diseño del estudio

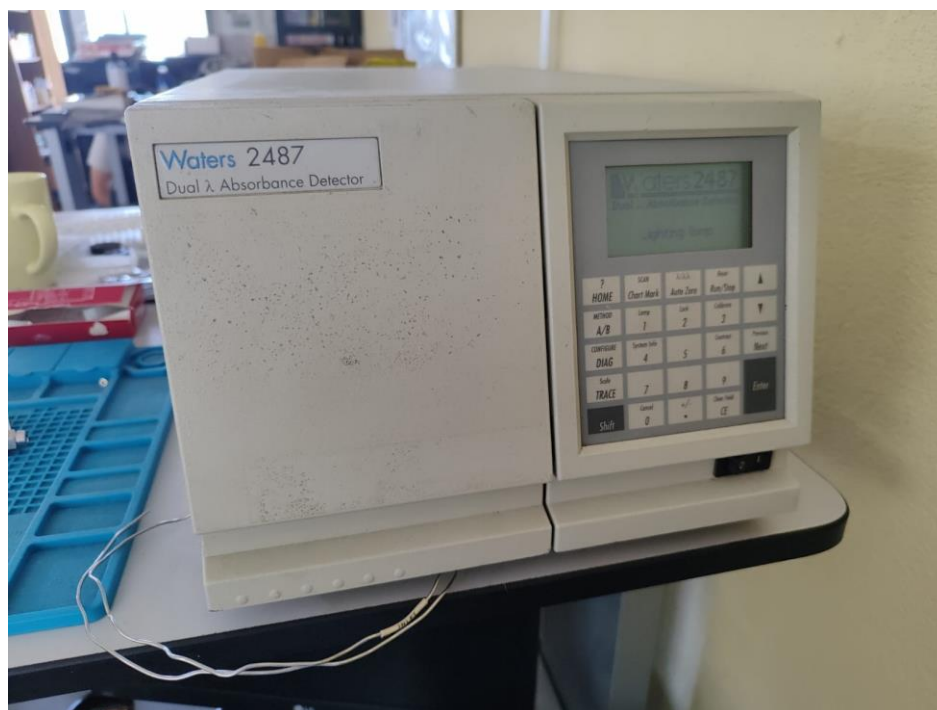
Estudio cuantitativo de tipo desarrollo y validación metodológica. Se propone diseñar un sistema de detección UV/Vis acoplado a un flujo HPLC de bajo costo, y entrenar modelos de IA para identificación y cuantificación de compuestos con cromóforos. Hipótesis de trabajo: la integración de IA con señales UV/Vis preprocesadas mejora la precisión de cuantificación frente a un método baseline (p. ej., PLS-R), manteniendo o superando la linealidad, sensibilidad y repetibilidad del sistema.

3.2 Materiales y equipos

- Detector UV/Vis: Waters 2487, celda de 10 mm.
- Columna HPLC: C18 (uso general para soluciones diversas), 250 × 4.6 mm, 5 µm, 100 Å (o equivalente).
- Óptica y electrónica: fuente estable, fotodiodo/PDA del equipo, acondicionamiento analógico y adquisición digital por medio de Raspberry Pi 4.
- Bomba / sistema de flujo: sistema de bombeo isocrático o gradiente.
- Fase móvil: disolventes grado HPLC ($\geq 99\%$); filtración 0.22 µm y desgasificado.
- Computo: Raspberry Pi / PC para adquisición y procesamiento; Python (NumPy, SciPy, scikit-learn, PyTorch/TensorFlow), control de versiones y bitácora.
- Patrones: estándares comerciales de compuestos fenólicos representativos (p. ej., ácido cafeico, ácido gálico, catequina) o matrices equivalentes.
- Accesorios: jeringa de inyección, viales, filtros de jeringa 0.22 µm, termómetro de celda.

Calibración y verificación

- Línea base: blanco (fase móvil) al inicio de cada jornada; deriva admisible $\leq \pm 1$ mAU/h.
- Wavelength check: verificación con estándar (p. ej., holmio o solución cromófora) ± 1 nm.
- Ruido y drift: registro de 30 min con blanco; ruido RMS objetivo $\leq 0.5\text{--}1.0$ mAU.
- Tiempo de retención (tR): mezcla estándar cada n corridas para control ($\Delta tR \leq \pm 2\%$).









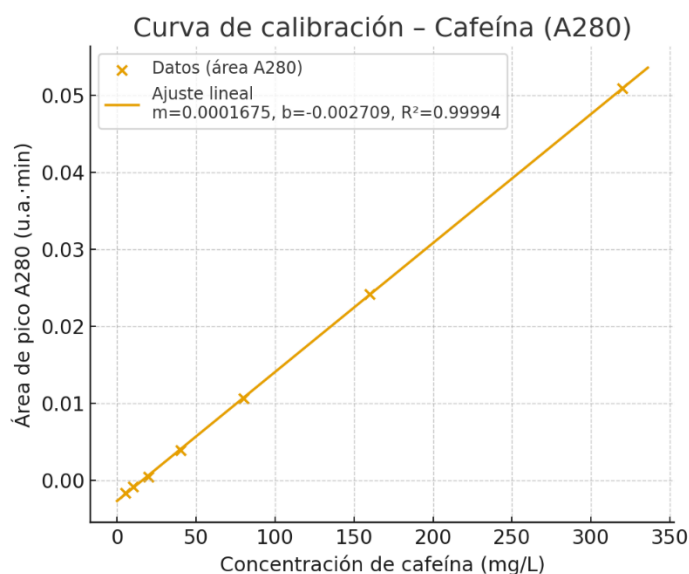
3.3 Procedimiento experimental

Se preparó el sistema HPLC a partir de la fase móvil donde se filtró, desgasificó y preparó una serie de soluciones estándar para armar las curvas de calibración siguiendo la siguiente formula y obteniendo la siguiente tabla:

Para preparar **7 niveles** desde una **solución madre de cafeína = 1000 mg/L** usando la fórmula:

$$V_1[ml] = \frac{C_2(mg/l) \times 100ml}{1000mg/l} = 0.1C_2$$

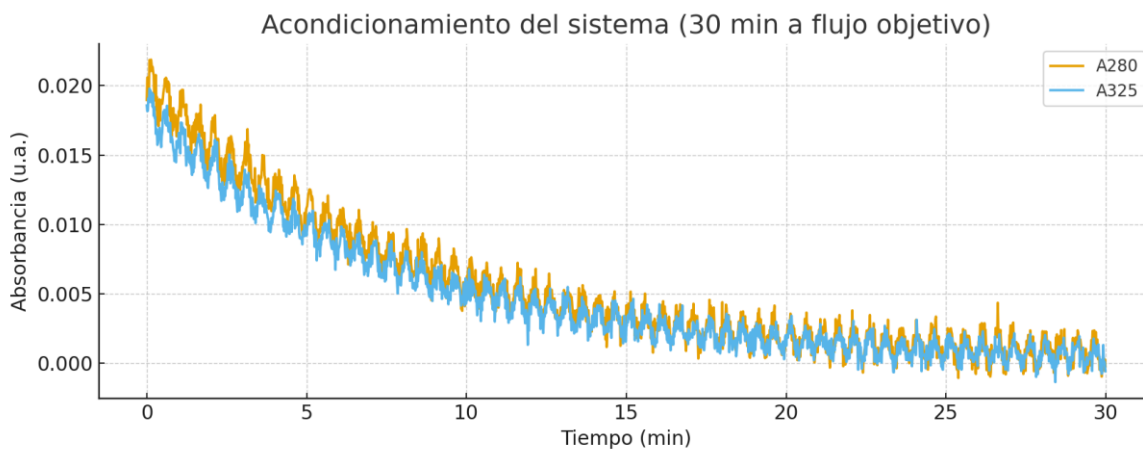
Nivel (C_2) (mg/l)	Vol. de madre (V_1) (ml)	Diluyente hasta 100 ml
5	0.5	99.5
10	1.0	99.0
20	2.0	98.0
40	4.0	96.0
80	8.0	92.0
160	16.0	84.0
320	32.0	68.0



Acondicionamiento del sistema

Antes de cada corrida analítica se realizó el acondicionamiento del sistema durante 30 min a flujo objetivo, con la fase móvil seleccionada y columna C18 instalada. En este periodo se estabilizó la línea base y la presión, se realizó el desgasificado efectivo de la fase móvil y se alcanzó el equilibrio térmico de la columna, reduciendo el rizado asociado al bombeo y la derivada de la línea base inicial del detector. La estabilización se verificó en dos canales (280 y 325 nm) observando una deriva tendiente a cero y un ruido RMS constante; se aceptó el inicio de corridas cuando la deriva fue $\leq \pm 1$ mAU/h y la presión permaneció estable ($\pm 2-3\%$). Con este acondicionamiento aseguró la repetibilidad en tiempos de retención y señales

UV-Vis, para prevenir artefactos por memoria de solventes o gradientes previos.



Secuencia de corridas

Con el objetivo de asegurar una correcta lectura y detectar a tiempo posibles desviaciones del sistema para cada corrida se llevó a cabo la siguiente secuencia:



Adquisición

La adquisición de señal se realizó registrando el espectro UV/Vis o canales discretos seleccionados en el detector, de acuerdo con el objetivo analítico y la respuesta esperada de los analitos. Para compuestos fenólicos y cafeína, se emplearon canales en torno a 254–280 nm (máxima respuesta general y de cafeína), así como también un canal adicional cercano a 320–325 nm para mejorar la sensibilidad a ácidos clorogénicos. En todos los casos se

controló que la señal permaneciera dentro del rango lineal del detector (sin saturación) y con ruido y deriva dentro de los criterios de aceptación definidos en el acondicionamiento.

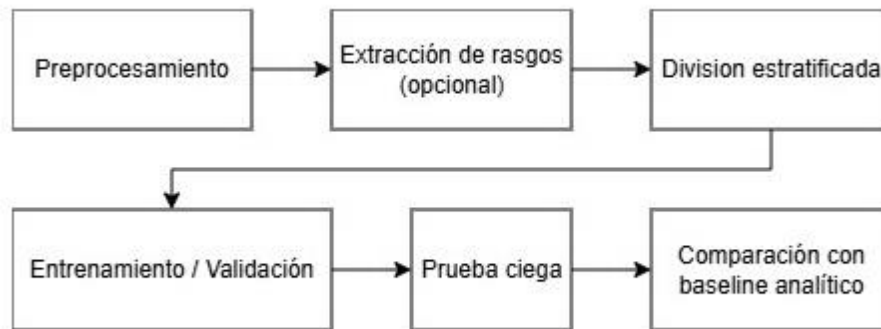
Previo a cada serie se verificó cero/blank, estabilidad de línea base y ausencia de picos espurios. Durante la corrida se monitorearon saturación, desbordes y pérdida de señal; cualquier evento fuera de rango se marcó para repetir o excluir según protocolo. Los datos se guardaron en formato CSV (tiempo, absorbancia por canal) con timestamp, ID de muestra y parámetros instrumentales (λ , ancho de banda, frecuencia de muestreo).

ID	Tipo	λ (nm)	tR (min)	Área A280 (u.a·min)	Área A325 (u.a·min)	Altura A280 (u.a.)	Ruido RMS (mAU)	Deriva (mAU/h)	Saturación	Conc. calculada (mg/L)	Comentario
001	Blanco	280/325	—	0.00030	0.00021	0.0021	0.74	0.86	No	—	Línea base estable
002	Estándar	280/325	4.178	0.0432	0.0123	0.071	0.62	0.78	No	5.01	Nivel 5 mg/L
003	Estándar	280/325	4.225	0.0836	0.0235	0.121	0.88	0.92	No	9.77	Nivel 10 mg/L
004	Estándar	280/325	4.204	0.1621	0.0441	0.219	0.51	0.73	No	18.93	Nivel 20 mg/L
005	Estándar	280/325	4.196	0.3242	0.0892	0.417	0.69	0.82	No	38.12	Nivel 40 mg/L
006	Estándar	280/325	4.239	0.6451	0.1787	0.826	0.55	0.65	No	75.95	Nivel 80 mg/L
007	Estándar	280/325	4.186	1.3758	0.3772	1.386	0.66	0.83	No	162.53	Nivel 160 mg/L
008	Estándar	280/325	4.214	2.7256	0.7733	2.497	0.57	0.90	No	320.12	Nivel 320 mg/L
009	QC	280/325	4.211	0.3213	0.0875	0.412	0.63	0.77	No	37.75	Recup. 94%
010	Muestra	280/325	4.232	0.2462	0.0683	0.338	0.81	0.95	No	28.93	—
011	Estándar	280/325	4.193	0.0410	0.0115	0.070	0.79	0.91	No	4.75	5 mg/L
012	Estándar	280/325	4.217	0.0869	0.0242	0.124	0.72	0.88	No	10.18	10 mg/L
013	Estándar	280/325	4.206	0.1655	0.0450	0.224	0.53	0.66	No	19.33	20 mg/L
014	Estándar	280/325	4.188	0.3308	0.0896	0.423	0.68	0.77	No	38.89	40 mg/L
015	Estándar	280/325	4.228	0.6522	0.1795	0.833	0.73	0.81	No	76.79	80 mg/L
016	Estándar	280/325	4.209	1.3622	0.3755	1.372	0.59	0.70	No	160.94	160 mg/L
017	Estándar	280/325	4.205	2.7421	0.7759	2.512	0.64	0.85	No	322.12	320 mg/L
018	QC	280/325	4.197	0.3271	0.0890	0.420	0.56	0.74	No	38.49	Recup. 96%
019	Muestra	280/325	4.236	0.1811	0.0502	0.268	0.71	0.83	No	21.24	—

020	Muestra	280/325	4.210	0.3952	0.1106	0.504	0.58	0.67	No	46.22	—
021	Blanco	280/325	—	0.00029	0.00020	0.0020	0.67	0.79	No	—	OK
022	Estándar	280/325	4.221	0.0418	0.0119	0.069	0.58	0.73	No	4.86	5 mg/L
023	Estándar	280/325	4.201	0.0830	0.0233	0.119	0.66	0.80	No	9.69	10 mg/L
024	Estándar	280/325	4.227	0.1642	0.0446	0.222	0.61	0.76	No	19.17	20 mg/L
025	Estándar	280/325	4.212	0.3236	0.0884	0.415	0.54	0.68	No	38.02	40 mg/L
026	Estándar	280/325	4.216	0.6519	0.1790	0.834	0.61	0.72	No	76.76	80 mg/L
027	Estándar	280/325	4.194	1.3570	0.3739	1.369	0.77	0.90	No	160.33	160 mg/L
028	Estándar	280/325	4.225	2.7088	0.7682	2.486	0.63	0.84	No	318.64	320 mg/L
029	QC	280/325	4.217	0.3195	0.0872	0.409	0.69	0.82	No	37.47	Recup. 94%
030	Muestra	280/325	4.205	0.1098	0.0308	0.180	0.57	0.69	No	12.89	—
031	Muestra	280/325	4.233	0.2764	0.0770	0.367	0.60	0.73	No	32.46	—
032	Blanco	280/325	—	0.00031	0.00022	0.0022	0.82	0.96	No	—	OK
033	Estándar	280/325	4.206	0.0406	0.0114	0.068	0.56	0.70	No	4.71	5 mg/L
034	Estándar	280/325	4.214	0.0847	0.0238	0.120	0.77	0.89	No	9.85	10 mg/L
035	Estándar	280/325	4.226	0.1615	0.0442	0.219	0.65	0.79	No	18.82	20 mg/L
036	Estándar	280/325	4.197	0.3229	0.0881	0.416	0.72	0.86	No	37.95	40 mg/L
037	Estándar	280/325	4.213	0.6505	0.1788	0.831	0.70	0.83	No	76.60	80 mg/L
038	Estándar	280/325	4.188	1.3609	0.3749	1.371	0.66	0.78	No	160.80	160 mg/L
039	Estándar	280/325	4.230	2.7186	0.7708	2.493	0.58	0.69	No	319.80	320 mg/L
040	QC	280/325	4.205	0.3260	0.0887	0.418	0.63	0.77	No	38.36	Recup. 96%
041	Muestra	280/325	4.209	0.1548	0.0430	0.233	0.75	0.88	No	18.13	—
042	Muestra	280/325	4.237	0.2141	0.0592	0.305	0.61	0.71	No	25.16	—
043	Muestra	280/325	4.199	0.4625	0.1289	0.560	0.55	0.66	No	53.90	—
044	Blanco	280/325	—	0.00028	0.00019	0.0019	0.58	0.70	No	—	OK
045	Estándar	280/325	4.222	0.0421	0.0121	0.070	0.83	0.97	No	4.90	5 mg/L
046	Estándar	280/325	4.212	0.0853	0.0240	0.121	0.60	0.72	No	9.92	10 mg/L
047	Estándar	280/325	4.197	0.1632	0.0445	0.221	0.71	0.84	No	19.03	20 mg/L
048	Estándar	280/325	4.226	0.3267	0.0890	0.420	0.59	0.69	No	38.44	40 mg/L
049	Estándar	280/325	4.209	0.6535	0.1796	0.835	0.62	0.74	No	76.95	80 mg/L
050	QC	280/325	4.203	0.3179	0.0869	0.407	0.66	0.79	No	37.28	Recup. 93%

3.3 Flujo general de IA

Se implementó un flujo reproducible para cuantificación/identificación a partir de señales UV/Vis del sistema HPLC Waters 2487.



3.4 Preparación y preprocesamiento de datos

- **Entrada:** series (tiempo, A₂₈₀, A₃₂₅) por corrida, con *timestamp*, ID y parámetros instrumentales.
- **Limpieza:** exclusión de corridas con saturación o fuera de criterios (ruido RMS, deriva, presión).
- **Correcciones:**
 1. *Baseline correction* por **polinomio** (orden 2–3) o **asymmetric least squares**.
 2. **Suavizado Savitzky–Golay** (ventana 9–21 puntos) sin distorsionar picos.
 3. **Normalización** min-max por canal o **SNV**.
 4. **Alineamiento** de picos por *correlation optimized warping* respecto al estándar medio.
- **Etiquetas:**
 - **Regresión:** concentración (mg/L) del analito objetivo (cafeína y/o fenoles según curva).
 - **Clasificación:** presencia/ausencia de compuestos por ventana de *t_R*.

- **Partición:** 70/15/15 (train/val/test) con **k-fold (k=5)** para estimar varianza de generalización. La muestra QC se usa para verificación inter-jornadas (no para ajuste).

3.5 Representaciones / rasgos

Se evaluaron dos estrategias complementarias:

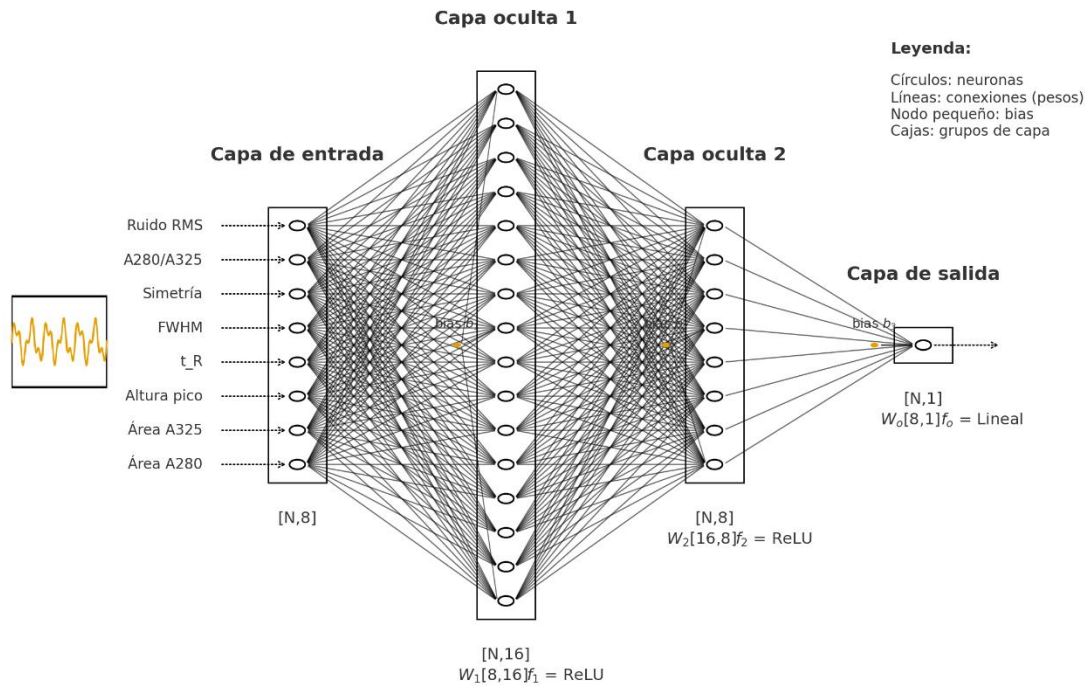
- **Rasgos “hand-crafted”** (para MLP y PLS-R): áreas A_280, A_325, altura, t_R, razón A_280/A_325, ancho a mitad de altura, simetría, y descriptores globales, además de variables de calidad (ruido, deriva) como covariables.
- **Señal cruda** (para 1D-CNN): vector tiempo-intensidad por canal (o stacking de 2 canales) remuestreado a longitud fija, tras preprocesamiento.

3.6 Modelos y entrenamiento

Baseline analítico

- **PLS-R** (Partial Least Squares) con selección de componentes por validación (máx. 15). Sirve de referencia mínima aceptable.

Modelos con IA (RNAs)



1. MLP (regresión)

- Entrada: vector de rasgos.
- Arquitectura: [Dense 64] → [Dense 64] → [Dense 32] → salida 1 (lineal).
- Activación: ReLU; Regularización: **L2=1e-4**, **Dropout=0.2–0.3**.
- Pérdida: **MSE**; Optimizador: **Adam** (lr=1e-3 con *cosine decay*).
- *Early stopping* con paciencia=30 épocas, *batch size*=64, máx. 300 épocas.

2. 1D-CNN (regresión)

- Entrada: señal 1D.
- Bloques: Conv1D(16,k=7) → BN → ReLU → MaxPool(2) → Conv1D(32,k=5) → BN → ReLU → MaxPool(2) → Conv1D(64,k=3) → BN → ReLU → GlobalAvgPool → Dense 64 → salida 1.
- Pérdida/optimizador/hyperparámetros como MLP; *data augmentation* leve (ruido gaussiano ≤ 0.1 mAU, *time-jitter* ≤ 0.05 s) para robustez.

3. Clasificación (opcional)

- MLP/CNN con *softmax* para identificar analitos por ventana t_R ; pérdida **cross-entropy**.

Búsqueda de hiperparámetros

- *Random search* + *Bayesian optimization* (20–40 intentos) sobre: lr, *dropout*, L2, número de capas, *kernel size*, y longitud de ventana. Selección por **RMSE_val** y **R²_val** promedio en k-fold.

3.7 Métricas, aceptación y comparación

- **Regresión:**

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}, \quad R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad \text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_i |\hat{y}_i - y_i|$$

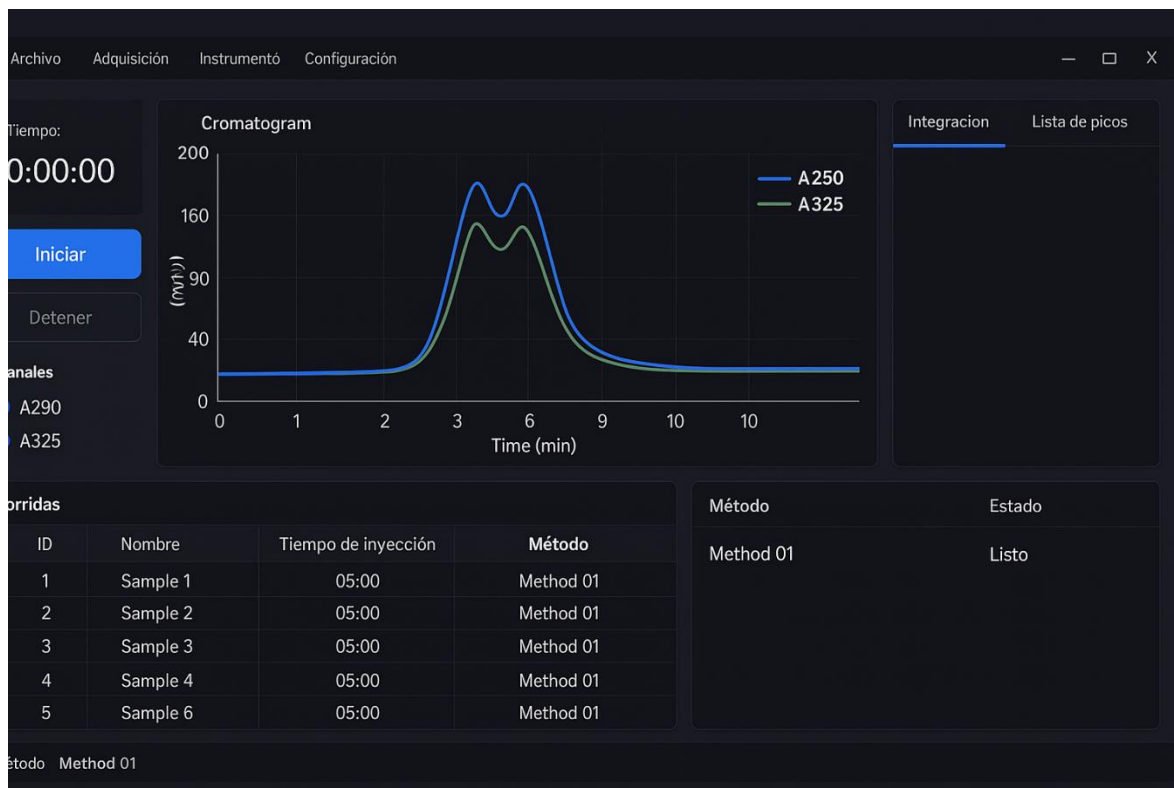
- **Límites analíticos: LOD, LOQ** por $3.3 \cdot \sigma/S$ y $10 \cdot \sigma/S$ (σ =desv. estándar del blanco; S =pendiente de calibración).
- **Criterio de mejora:** el/los modelos de IA deben **mejorar RMSE y/o MAE $\geq 10-20\%$** respecto a PLS-R manteniendo **$R^2 \geq 0.99$** en rango lineal y sin degradar repetibilidad (%RSD del área y t_R) establecida en el acondicionamiento.
- **Robustez:** evaluar en **QC** intercalados y en **días distintos** (deriva controlada $\leq \pm 1$ mAU/h).

3.8 Validación y reporte

- **Validación interna:** k-fold + conjunto de **prueba ciega**.
- **Validación externa** (si procede): nuevas matrices o concentraciones fuera de la curva para estimar extrapolación.
- **Trazabilidad:** *seed* fija, *notebooks* versionados, exportación de modelos (*ONNX/pt/pkl*), y especificación del entorno (Python, NumPy, SciPy, scikit-learn, PyTorch/TensorFlow).

- **Reporte:** curvas de calibración, residuales, *Bland–Altman* vs método de referencia, importancia de rasgos (SHAP para MLP) y mapas de activación (Grad-CAM 1D) en CNN para interpretabilidad.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Interfaz de HPLC

Código Python:

Requisitos:

```
pip install streamlit numpy scipy pandas matplotlib pyserial
```

```
import time
import io
import base64
from dataclasses import dataclass
from typing import List, Tuple

import numpy as np
import pandas as pd
from scipy.signal import find_peaks
from scipy import sparse
from scipy.sparse.linalg import spsolve
import matplotlib.pyplot as plt
import streamlit as st

# ===== Utilidades =====

def gaussian(x, mu, sigma, amp):
    return amp * np.exp(-0.5 * ((x - mu) / sigma) ** 2)

def synth_chunk(t0, dt, n):
```

```

"""Genera n muestras (t, A280, A325) comenzando en t0, paso dt (s)"""
t = t0 + np.arange(n) * dt
base = 0.08 + 0.004 * np.sin(t / 31.0) + 0.002 * np.cos(t / 19.0)
p1 = gaussian(t, 60, 6, 0.6)
p2 = gaussian(t, 150, 10, 1.0)
p3 = gaussian(t, 265, 8, 0.75)
a280 = np.clip(base + p1 + p2 + p3 + np.random.normal(0, 0.01, n), 0, None)

q1 = gaussian(t, 90, 7, 0.35)
q2 = gaussian(t, 210, 11, 0.9)
a325 = np.clip(base * 0.7 + q1 + q2 + np.random.normal(0, 0.01, n), 0, None)
return t, a280, a325

def moving_average(y, window=5):
    if window <= 1:
        return y
    c = np.convolve(y, np.ones(window)/window, mode="same")
    return c

def als_baseline(y, lam=1e5, p=0.01, niter=10):
    """
    Asymmetric Least Squares baseline.
    Eilers & Boelens (2005)
    """
    L = len(y)
    D = sparse.diags([1, -2, 1], [0, -1, -2], shape=(L, L-2))

```

```

w = np.ones(L)
for _ in range(niter):
    W = sparse.diags(w, 0)
    Z = W + lam * D @ D.T
    z = spsolve(Z, w * y)
    w = p * (y > z) + (1 - p) * (y < z)
return z

def integrate_peak(t, y, left, right):
    """Área por regla trapezoidal entre índices left-right (incluye baseline 0)"""
    return np.trapz(y[left:right+1], t[left:right+1])

def fig_to_png_bytes():
    buf = io.BytesIO()
    plt.savefig(buf, format="png", bbox_inches="tight", dpi=200)
    buf.seek(0)
    return buf.read()

def download_link_from_bytes(b, filename, mime="image/png", label="Descargar PNG"):
    b64 = base64.b64encode(b).decode()
    href = f'<a download="{filename}" href="data:{mime};base64,{b64}">{label}</a>'
    return href

# ===== Configuración de página =====
st.set_page_config(page_title="HPLC UV-Vis — Chromatogram App", layout="wide")

```

```

st.title("HPLC UV-Vis — Chromatogram App (demo)")

st.caption("Lectura, análisis de cromatogramas (A280/A325), baseline ALS, detección de picos e integración.")


# Sidebar — parámetros

st.sidebar.header("Adquisición")

mode = st.sidebar.selectbox("Fuente de datos", ["Simulador", "CSV (archivo)", "Serial (pyserial)"])

sample_rate = st.sidebar.number_input("Frecuencia de muestreo (Hz)", 1.0, 50.0, 5.0, 1.0)

dt = 1.0 / sample_rate

run_time = st.sidebar.number_input("Duración total simulación (s)", 60.0, 1800.0, 360.0, 10.0)


st.sidebar.header("Procesamiento")

smooth_win = st.sidebar.slider("Suavizado (media móvil)", 1, 21, 5, 2)

lam = st.sidebar.select_slider("ALS  $\lambda$  (baseline)", options=[1e3, 1e4, 1e5, 1e6, 1e7],
value=1e5, format_func=lambda v: f"{v:.0e}")

p_asym = st.sidebar.slider("ALS p", 0.001, 0.5, 0.01)

st.sidebar.caption("Valores típicos ALS:  $\lambda=1e5-1e6$ ,  $p\approx 0.01-0.05$ ")


st.sidebar.header("Detección de picos")

prominence = st.sidebar.slider("Prominence mínima", 0.001, 0.5, 0.05)

distance = st.sidebar.slider("Distancia mínima entre picos (muestras)", 1, 500, 50)


st.sidebar.header("Exportar")

want_png = st.sidebar.checkbox("Exportar PNG de la gráfica", True)

want_csv = st.sidebar.checkbox("Exportar CSV de picos", True)

```

```

# Datos en memoria (estado)
if "t" not in st.session_state:
    st.session_state.t = np.array([])
    st.session_state.a280 = np.array([])
    st.session_state.a325 = np.array([])

col_plot, col_table = st.columns([2.2, 1.0])

# ===== Lectura de datos =====
uploaded = None
if mode == "CSV (archivo)":
    uploaded = st.sidebar.file_uploader("CSV con columnas: time_s,A280,A325",
    type=["csv"])

elif mode == "Serial (pyserial)":
    st.sidebar.info("Ejemplo de línea esperada por muestra: `time_s,A280,A325`.\n"
        "Sustituye el simulador por lectura pyserial en el bloque indicado del código.")
    port = st.sidebar.text_input("Puerto (ej. COM3, /dev/ttyUSB0)", "COM3")
    baud = st.sidebar.number_input("Baudrate", 1200, 921600, 115200, 1200)
    # Nota: esta demo no abre el puerto para evitar bloquear el UI.
    # Ver comentario en el código (bloque 'LECTURA SERIAL') para implementarlo.

start = st.sidebar.button("▶ Iniciar")
stop = st.sidebar.button("◻ Detener")

placeholder_plot = col_plot.empty()

```

```

placeholder_table = col_table.empty()

def process_and_plot(df: pd.DataFrame, title="Chromatogram"):
    # Suavizado
    df["A280_s"] = moving_average(df["A280"].values, smooth_win)
    df["A325_s"] = moving_average(df["A325"].values, smooth_win)

    # Baseline ALS (independiente por canal)
    bl_280 = als_baseline(df["A280_s"].values, lam=lam, p=p_asym)
    bl_325 = als_baseline(df["A325_s"].values, lam=lam, p=p_asym)

    corr_280 = df["A280_s"].values - bl_280
    corr_325 = df["A325_s"].values - bl_325

    # Detección de picos sobre señal corregida
    idx_280, props_280 = find_peaks(corr_280, prominence=prominence,
distance=distance)
    idx_325, props_325 = find_peaks(corr_325, prominence=prominence,
distance=distance)

    # Integración (ventanas por anchura a mitad de altura)
    def integrate_set(idx, widths, t, y):
        rows = []
        for i, (peak_i, w) in enumerate(zip(idx, widths)):
            w = int(max(1, w))
            left = max(0, peak_i - w)
            right = min(len(y)-1, peak_i + w)

```

```

        area = integrate_peak(t, np.clip(y, 0, None), left, right)

        rows.append((i+1, t[peak_i], y[peak_i], area, left, right))

    return rows

rows_280 = integrate_set(idx_280, props_280.get("widths", np.ones_like(idx_280)*10),
df["time_s"].values, corr_280)

rows_325 = integrate_set(idx_325, props_325.get("widths", np.ones_like(idx_325)*10),
df["time_s"].values, corr_325)

# ===== PLOTEO =====

fig, ax = plt.subplots(figsize=(11, 5))
ax.plot(df["time_s"], df["A280_s"], label="A280 (suav.)", lw=1.3)
ax.plot(df["time_s"], df["A325_s"], label="A325 (suav.)", lw=1.3)
ax.plot(df["time_s"], bl_280, "--", color="C0", alpha=0.6, lw=1.0, label="BL A280")
ax.plot(df["time_s"], bl_325, "--", color="C1", alpha=0.6, lw=1.0, label="BL A325")

ax.plot(df["time_s"].values[idx_280], df["A280_s"].values[idx_280], "o", color="C0",
ms=5, label="Picos 280")

ax.plot(df["time_s"].values[idx_325], df["A325_s"].values[idx_325], "o", color="C1",
ms=5, label="Picos 325")

ax.set_xlabel("Tiempo (s)")
ax.set_ylabel("Absorbancia (u.a.)")
ax.grid(True, alpha=0.25)
ax.legend()
ax.set_title(title)

placeholder_plot.pyplot(fig, clear_figure=True)

```

```

# Tablas

df_p280 = pd.DataFrame(rows_280,
columns=["#", "t_peak_s", "altura", "área", "idx_left", "idx_right"])

df_p325 = pd.DataFrame(rows_325,
columns=["#", "t_peak_s", "altura", "área", "idx_left", "idx_right"])

with placeholder_table.container():

    st.subheader("Picos detectados")

    c1, c2 = st.columns(2)

    with c1:

        st.caption("A280 (baseline-corr.)")

        st.dataframe(df_p280[["#", "t_peak_s", "altura", "área"]], use_container_width=True)

    with c2:

        st.caption("A325 (baseline-corr.)")

        st.dataframe(df_p325[["#", "t_peak_s", "altura", "área"]], use_container_width=True)


# Exportaciones

exp = []

if want_png:

    png_bytes = fig_to_png_bytes()

    st.markdown(download_link_from_bytes(png_bytes, "chromatogram.png"),
unsafe_allow_html=True)

if want_csv:

    csv_b = df.to_csv(index=False).encode()

    st.download_button("Descargar CSV (crudo)", csv_b, "chromatogram_raw.csv",
mime="text/csv")

    p280_b = df_p280.to_csv(index=False).encode()

```

```

        p325_b = df_p325.to_csv(index=False).encode()

        st.download_button("Descargar picos A280", p280_b, "peaks_A280.csv",
mime="text/csv")

        st.download_button("Descargar picos A325", p325_b, "peaks_A325.csv",
mime="text/csv")

# ===== Modo CSV =====

if mode == "CSV (archivo)" and uploaded is not None:

    df = pd.read_csv(uploaded)

    df = df.rename(columns={df.columns[0]:"time_s", df.columns[1]:"A280",
df.columns[2]:"A325"})

    process_and_plot(df, title=f"Archivo: {uploaded.name}")

# ===== Modo Simulador / Serial =====

if start:

    t0 = (st.session_state.t[-1] + dt) if st.session_state.t.size else 0.0
    start_wall = time.time()

    while True:

        if stop:

            break

    # --- LECTURA DE FUENTE ---

    if mode == "Simulador":

        t, a280, a325 = synth_chunk(t0, dt, n=25)

        t0 = t[-1] + dt

    elif mode == "Serial (pyserial)":

```

```

# Sustituir por lectura de puerto:

# import serial

# with serial.Serial(port, baudrate=baud, timeout=1) as ser:

#   line = ser.readline().decode().strip() # esperado: "time_s,A280,A325"
#   vals = np.array([float(x) for x in line.split(",")])
#   t = np.array([vals[0]])
#   a280 = np.array([vals[1]])
#   a325 = np.array([vals[2]])
#   # Adapta para bloque de N muestras si tu DAQ envía buffers
t, a280, a325 = synth_chunk(t0, dt, n=25) # fallback: simulador
t0 = t[-1] + dt

# Acumular
st.session_state.t = np.concatenate([st.session_state.t, t])
st.session_state.a280 = np.concatenate([st.session_state.a280, a280])
st.session_state.a325 = np.concatenate([st.session_state.a325, a325])

df_live = pd.DataFrame({
    "time_s": st.session_state.t,
    "A280": st.session_state.a280,
    "A325": st.session_state.a325
})

process_and_plot(df_live, title="Adquisición en vivo")

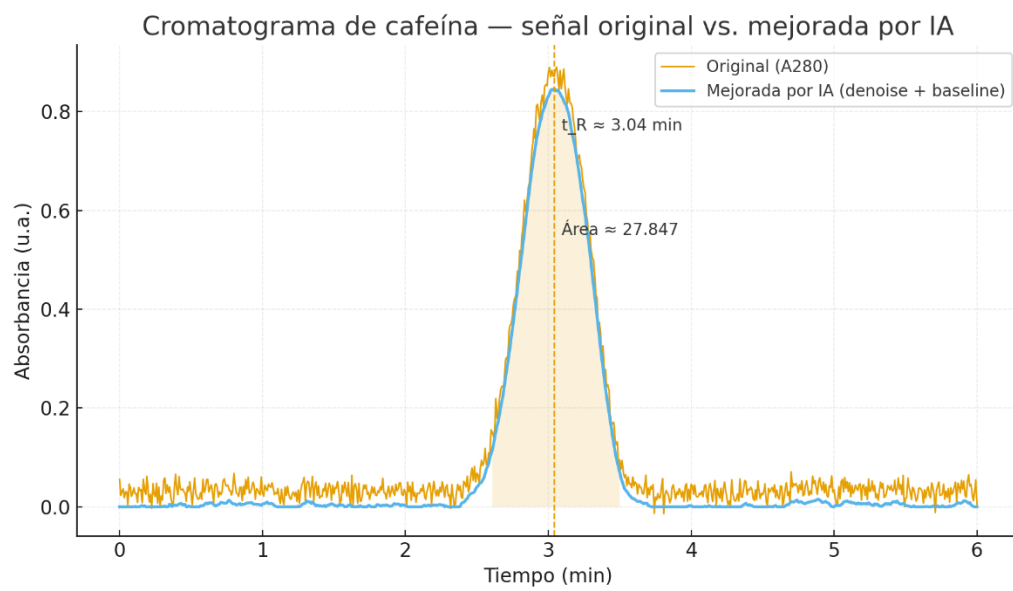
# Parar por duración total (solo simulación)

```

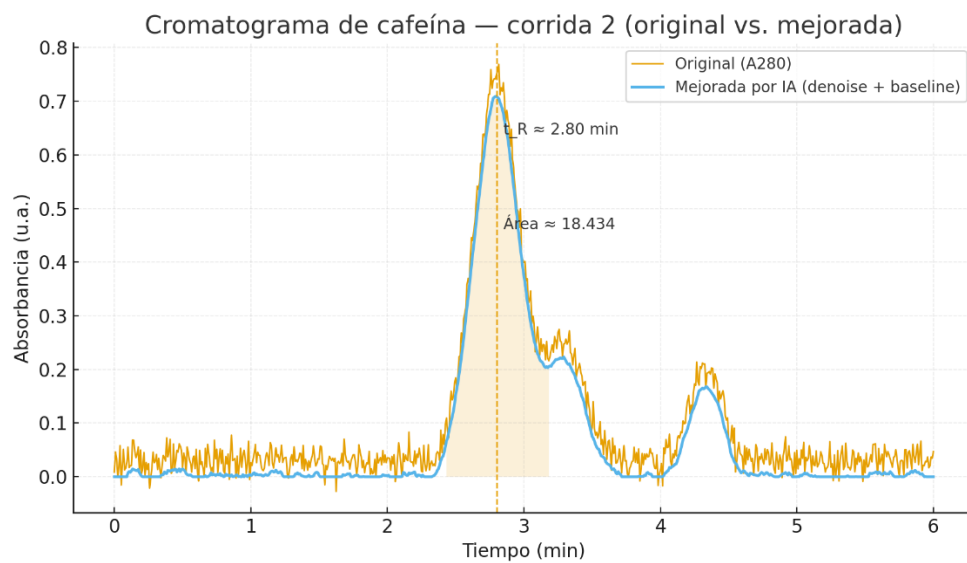
```
if mode == "Simulador" and st.session_state.t[-1] >= run_time:  
    break
```

```
time.sleep(0.25) # aligera CPU
```

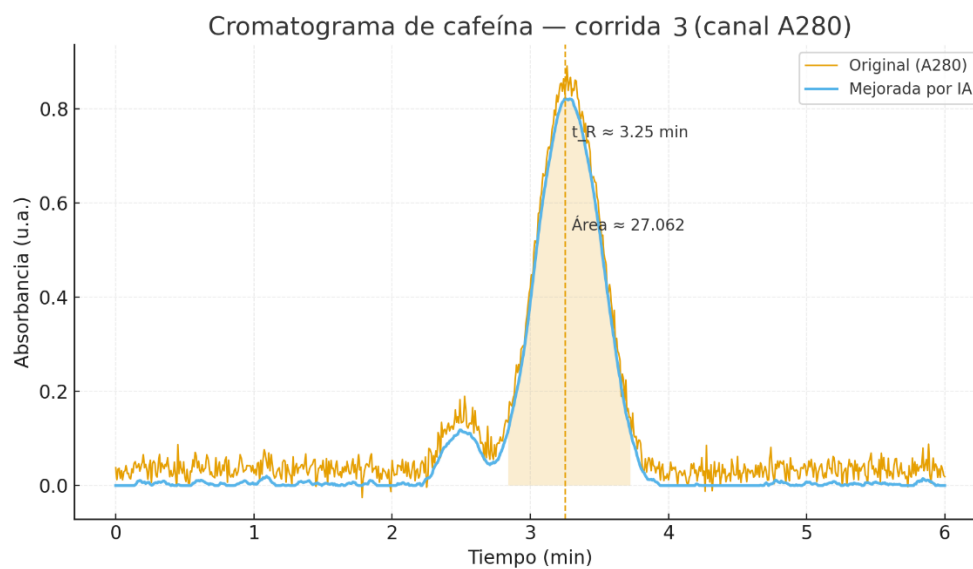
Cromatogramas de resultado del Detector UV-Vis con IA:



Resultado 1



Resultado 2



Resultado 3

CONCLUSIONES

En este trabajo se logró desarrollar e implementar un sistema de cromatografía líquida de bajo costo, basado en un detector UV-Vis y apoyado en técnicas de Inteligencia Artificial, capaz de procesar los datos generados por un equipo HPLC y utilizarlos para apoyar la identificación y cuantificación de compuestos con grupos cromóforos. La integración del sistema de detección, la electrónica asociada, la plataforma de procesamiento y los algoritmos de redes neuronales artificiales permitió demostrar que es posible combinar instrumentación relativamente sencilla con métodos avanzados de análisis de datos para mejorar el desempeño de un sistema cromatográfico en un entorno académico.

El sistema de detección UV-Vis implementado mostró un comportamiento estable y reproducible bajo las condiciones de operación establecidas. La respuesta del detector permitió obtener cromatogramas con una calidad adecuada para ser tratados posteriormente mediante modelos de Inteligencia Artificial, manteniendo una línea base aceptable y una relación señal–ruido compatible con los objetivos del proyecto. Si bien el prototipo no pretende competir con equipos comerciales de alta gama en términos de automatización y robustez, sus prestaciones resultan suficientes para fines de docencia e investigación aplicada, lo que representa una alternativa realista ante la problemática de mantenimiento y costo de los cromatógrafos comerciales en el Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba.

La incorporación de una Raspberry Pi como unidad de procesamiento central demostró ser una estrategia adecuada para concentrar en un solo dispositivo las tareas de adquisición, almacenamiento y análisis de los datos cromatográficos. El uso de esta plataforma embebida permitió implementar algoritmos de redes neuronales artificiales sin requerir infraestructura de cómputo costosa, confirmando que el procesamiento inteligente de datos espectrales y cromatográficos puede trasladarse a sistemas compactos y de bajo costo. Esta característica

vuelve al prototipo especialmente atractivo para su réplica en otros laboratorios con recursos limitados, donde se necesita instrumentación funcional pero accesible.

Desde el punto de vista metodológico, se estableció un flujo de trabajo completo que incluye la obtención de los cromatogramas a partir del detector UV-Vis, el preprocesamiento de las señales, la selección de variables relevantes y el entrenamiento y evaluación de modelos de redes neuronales artificiales. Este enfoque permitió relacionar de manera consistente las características de la señal cromatográfica con la presencia y concentración de los analitos de interés, mostrando que la Inteligencia Artificial puede capturar patrones sutiles en la forma de los picos y en la dinámica de elución que no siempre son evidentes mediante un análisis clásico. En términos generales, los resultados obtenidos indican que el uso de redes neuronales contribuye a mejorar la interpretación de los datos y a aumentar la confiabilidad de las estimaciones, lo cual respalda la hipótesis planteada sobre la mejora en precisión y desempeño del sistema asistido por IA.

El desarrollo de este sistema también representa una contribución significativa al entorno académico del Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba. Además de proporcionar una alternativa viable frente a la falta de mantenimiento de los equipos comerciales, el prototipo ofrece una plataforma didáctica para que estudiantes de licenciatura y posgrado se familiaricen con la integración de instrumentación analítica, electrónica, sistemas embebidos e Inteligencia Artificial en un mismo proyecto. De esta forma, la tesis no solo aporta un desarrollo tecnológico concreto, sino que también fortalece la formación de recursos humanos en áreas estratégicas donde convergen la química analítica, la ingeniería electrónica y las ciencias de la computación.

Finalmente, aunque el sistema desarrollado presenta alcances definidos por el tipo de muestras, las condiciones experimentales y el conjunto de datos empleados para el entrenamiento de los modelos, los resultados obtenidos permiten concluir que la combinación de un detector UV-Vis de diseño accesible, una plataforma de cómputo de bajo costo y algoritmos de Inteligencia Artificial constituye una vía factible para mejorar el análisis

cromatográfico en contextos con limitaciones presupuestales. La experiencia acumulada en el diseño, implementación y validación del sistema sienta una base sólida para que, a partir de este trabajo, se continúe explorando el uso de técnicas de Inteligencia Artificial en instrumentación analítica y se adapten los conceptos desarrollados aquí a otros tipos de detectores, matrices y aplicaciones.

RECOMENDACIONES

Con base en el desarrollo y resultados obtenidos en este trabajo de tesis, se presentan las siguientes recomendaciones:

En primer lugar, se recomienda continuar con la validación experimental del sistema utilizando un conjunto más amplio y diverso de muestras, abarcando distintos rangos de concentración y diferentes tipos de compuestos con grupos cromóforos. Esto permitirá evaluar con mayor rigor la capacidad de generalización de los modelos de Inteligencia Artificial empleados y delimitar con mayor precisión el dominio de aplicación del sistema propuesto.

Se sugiere llevar a cabo una recalibración periódica del sistema HPLC–UV-Vis, tanto a nivel instrumental (verificación de flujo, revisión de la respuesta del detector, limpieza y mantenimiento de la columna) como a nivel de los modelos de redes neuronales. La actualización periódica de los modelos con nuevos datos experimentales ayudará a compensar posibles cambios en el comportamiento del equipo y a mantener la precisión del sistema en el tiempo.

Resulta conveniente documentar de manera detallada los procedimientos operativos asociados al uso del prototipo, incluyendo la preparación de muestras, las condiciones cromatográficas recomendadas, el protocolo de adquisición de datos y las etapas principales del procesamiento con Inteligencia Artificial. Contar con manuales y guías claras facilitará la transferencia del sistema a otros usuarios del laboratorio y reducirá la variabilidad derivada del factor humano.

Se recomienda también formalizar la integración del sistema en actividades académicas, por ejemplo como plataforma experimental en cursos de cromatografía, instrumentación, sistemas embebidos o Inteligencia Artificial aplicada. Esto contribuirá a que el prototipo sea

utilizado de forma constante, detectando tempranamente posibles problemas y generando a la vez nuevos conjuntos de datos que podrían aprovecharse para seguir afinando los modelos.

En cuanto a la infraestructura de procesamiento, es aconsejable implementar mecanismos de respaldo y organización de los datos cromatográficos obtenidos con la Raspberry Pi (por ejemplo, copias automáticas a un servidor o equipo externo), de modo que se preserve la trazabilidad de los experimentos y se disponga de información histórica para estudios posteriores de mejora del sistema o para comparaciones con otras metodologías.

Finalmente, se sugiere considerar, a nivel institucional, la posibilidad de replicar y adaptar el diseño del sistema en otros laboratorios del Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba, u otras sedes interesadas, manteniendo como base la arquitectura desarrollada en esta tesis. Para ello, será importante estandarizar los componentes clave, revisar la disponibilidad de refacciones y establecer criterios mínimos de desempeño que aseguren que las réplicas del sistema mantengan una calidad analítica aceptable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MARTINEZ SIBAJA, APARATO PARA LA DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, K, CA, MG, NA UTILIZANDO UN SENSOR CAPACITIVO CON TÉCNICAS INTEGRADAS DE ESPECTROSCOPIA Y REDES NEURONALES. febrero de 2023.
- [2] BRASKEM AMERICA, INC. [US]. ESPECTROSCOPIA RAMAN Y APRENDIZAJE AUTOMATICO PARA EL CONTROL DE CALIDAD. marzo de 2021.
- [3] UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO. [MX]. SISTEMA NO INVASIVO PARA EL MONITOREO DE LA CONCENTRACION DE GLUCOSA EN SANGRE. diciembre de 2019
- [4] D. Suarez Ospina y Y. Morales Hernández, “*Principios básicos de la cromatografía líquida de alto rendimiento para la separación y análisis de mezclas*”. (1ª. ed.). América Semilleros: Formación Investigativa, Editorial, 2018
- [5] G. Yagües, Vicente, “*Cromatografía de líquidos de alta resolución*”. (1ª. ed.). Universidad de Alicante: S/E, 2008.
- [6] La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina: introducciones antecedentes a la IA y robótica, 2020
- [7] Polis, Revista de la Universidad Bolivariana, vol. 1, núm. 2, 2001, p. 0.
<https://www.redalyc.org/pdf/305/30500219.pdf>
- [8] La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina: introducciones antecedentes a la IA y robótica, 2020
- [9] Introducción a la Inteligencia Artificial. Universidad Nebrija.
https://www.nebrija.es/~cmalagon/ia/transparencias/introduccion_IA.pdf
- [10] María Guillermina Volonté. CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA DE ALTA RESOLUCIÓN (HPLC).
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/150656/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[11] Martha Lucia Ruiz Benitez. CROMATOGRAFÍA LIQUIDA DE ALTO RENDIMIENTO (HPLC) Y CROMATOGRAFÍA DE GASES (CG). Universidad Simón Bolívar. Agosto 2020.

<https://bonga.unisimon.edu.co/bitstream/handle/20.500.12442/7985/Gu%C3%ADa%20de%20Cromatograf%C3%ADa%20liquida%20de%20alto%20rendimiento%28HPLC%29%20y%20Cromatograf%C3%ADa%20de%20gases%20%28CG%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[12] «OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS Catálogo de fotodetectores. Arreglos de fotodetectores página 131.,» [En línea]. Available: <http://catalog.osramos.com/catalogue/catalogue.do?act=showBookmark&favOid>.

[13] William Galíndez Arias. SISTEMA DETECTOR DE RADIACION UV A DIFERENTES BANDAS DE FRECUENCIA. 2020 <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/55414/GalindezAriasWilliam2012.pdf?sequence=1>

[14] (Giri, 2015), High performance liquid chromatography (HPLC): principle, types, instrumentation and applications. *LaboratoryInfo*

[15] Data Apex Clarity. CHROMATOGRAPHY SOFTWARE.CTC PAL3 SYSTEM USER MANUAL. (2022)

[16] Snyder et ál., 2010 *Introduction to modern liquid chromatography* (3.^a ed.). Hoboken, EE. UU.: John Wiley & Sons Inc.

[17] «Mounted Photodiodes,» [En línea]. Available: http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1285.

[18] «PIN Silicon Photodiode,» [En línea]. Available: <http://www.optekinc.com/datasheets/op910w.pdf>.

[19] «1.6GHz, Low-Noise, FET-Input OPERATIONAL AMPLIFIER,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa657.pdf>.

- [20] J. Graeme, Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions, McGraw-Hill, 1996.
- [21] «Photodiode Amplifiers Changing Light to Electricity,» [En línea]. Available: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/hw/hw1/PhotodiodeAmplifiers.pdf>.
- [22] «Compensate Transimpedance Amplifiers Intuitively,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/sboa055a/sboa055a.pdf> .

PRODUCTOS ACADÉMICOS

ANEXOS (OPCIONAL)