

SEGUIMIENTO EN TIEMPO REAL DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN UN REACTOR CONTINUO MEDIANTE TRAZADORES Y MATLAB

ALEXANDER BALZA

alza.alexander@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

ANDREINA IDLER

andreina.idler@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

AURIMAR RASQUIN

xxxxx@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

NATALIA FERNÁNDEZ

natalia.fernandez@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

NICOLE MORENO

nicole.moreno@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

RICARDO ÁVILA

ricardo.avila@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

ROSA MONTES DE OCA

montesdeoca.rosa@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

SOPHIA FUNG

sophia.fung@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

MIGUEL PÉREZ

mperez@unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, (Venezuela)

Resumen:

La determinación del tiempo de residencia (RTD) es fundamental para optimizar procesos químicos, ya que influye en la conversión de reactivos, la selectividad de productos y la eficiencia global del reactor. Este estudio se centra en la caracterización de la distribución del RTD en un reactor de flujo pistón vertical a escala de laboratorio, utilizando un trazador colorante y un sistema de

RECIBIDO: 09-07-2025 / ACEPTADO: 13-09-2025 / PUBLICADO: 22-12-2025

Cómo citar: Balza, et al., (2025). Seguimiento en tiempo real del tiempo de residencia en un reactor continuo mediante trazadores y MATLAB. *Cuadernos Unimetanos*, 2025-2, 25 - 48. <https://doi.org/10.58479/cu.2025.191>



adquisición de datos en tiempo real. Se implementó un sistema experimental que incluye una bomba peristáltica, un sensor de luz LDR, un Arduino UNO y una aplicación desarrollada en MATLAB App Designer para la recolección y análisis de datos. Los resultados indican que el aumento del caudal reduce el tiempo promedio de residencia, y se validó el uso de la distribución de Weibull para modelar el comportamiento no ideal del reactor. Este trabajo no solo contribuye a la caracterización de reactores no ideales, sino que también proporciona una plataforma educativa que permite a los estudiantes replicar el experimento y analizar datos en tiempo real, destacando la utilidad de herramientas modernas en la enseñanza de conceptos clave en ingeniería química. Este estudio está alineado con los ODS 4 (Educación de Calidad), 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y 12 (Producción y Consumo Responsables).

Palabras clave: reactor de flujo pistón, tiempo de residencia (RTD), distribución de Weibull, trazador colorante, adquisición de datos, educación de calidad, producción y consumo responsables, innovación.

Objetivo (s) del Desarrollo Sustentable (ODS) al cual se orienta el trabajo de investigación

4- EDUCACIÓN DE CALIDAD

Descripción

Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.

Relación

Proporcionar una plataforma educativa innovadora y accesible para la enseñanza experimental en ingeniería química. Proporcionar una plataforma educativa innovadora y accesible para la enseñanza experimental en ingeniería química.

Objetivo directo

9- INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

Descripción

Construir infraestructura resistente, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.

Relación

Mediante la integración de tecnologías de bajo costo (Arduino, sensores ópticos y MATLAB) para el monitoreo en tiempo real de procesos industriales

Objetivo directo

12- PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

Descripción

Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

Relación

Promover metodologías eficientes y replicables que optimizan recursos en laboratorios docentes y fomentan la sostenibilidad en la formación de futuros ingenieros.

Objetivo directo

CONTENIDO

Resumen:	25
Introducción	29
Objetivos de la investigación	32
Diseño experimental	33
Resultados y discusiones	39
Conclusiones	45
Referencias	46

Introducción

Los reactores químicos son equipos fundamentales en la ingeniería química, diseñados para maximizar la conversión de reactivos y la selectividad de productos mientras se minimizan los costos operativos. Entre los reactores de flujo continuo, el reactor de flujo pistón (RFP) destaca por su flujo unidireccional axial, que idealmente no presenta mezcla en la dirección del flujo. Sin embargo, en la práctica, los reactores reales suelen desviarse de este comportamiento ideal debido a fenómenos como la dispersión axial y la formación de zonas estancadas, lo que afecta la distribución del tiempo de residencia (RTD) y, en consecuencia, la eficiencia del proceso. La determinación experimental del RTD es crucial para comprender y optimizar estos sistemas, especialmente en aplicaciones educativas donde los estudiantes deben aprender a relacionar la teoría con la práctica.

Este trabajo presenta un estudio experimental para caracterizar el RTD en un RFP a escala de laboratorio, utilizando un trazador colorante y herramientas de adquisición de datos en tiempo real. Este enfoque no solo permite validar modelos teóricos, sino también demostrar la aplicación de tecnologías modernas en la enseñanza de la ingeniería química, contribuyendo así a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 4 (Educación de Calidad) y 9 (Industria, Innovación e Infraestructura).

El diseño experimental y el sistema de adquisición de datos desarrollado en este estudio ofrecen una herramienta valiosa para la enseñanza de la ingeniería química. Los estudiantes pueden replicar el experimento utilizando materiales accesibles, como una bomba peristáltica, sensores de luz LDR y una plataforma de procesamiento de datos basada en Arduino y MATLAB. Esta configuración les permite comprender en detalle la determinación del RTD, la influencia del caudal en el tiempo de residencia y la aplicación de modelos matemáticos como la distribución de Weibull para describir el comportamiento del sistema.

Además, este enfoque facilita el aprendizaje de competencias clave en instrumentación y análisis de datos, promoviendo el desarrollo de habilidades prácticas en el manejo de sensores, adquisición de datos y modelado matemático. La posibilidad de visualizar y analizar en tiempo real la respuesta del sistema ante cambios operacionales refuerza la conexión entre teoría y práctica, preparando a los estudiantes para enfrentar problemas reales en el diseño y optimización de reactores. Por lo tanto, este estudio no solo contribuye al análisis del RTD en reactores no ideales, sino que también sirve como una plataforma educativa para la enseñanza

de principios fundamentales de cinética química, dinámica de fluidos y control de procesos, consolidando el uso de metodologías activas en la formación de ingenieros químicos.

Este trabajo puede ser utilizado como una herramienta educativa valiosa en diversas áreas del conocimiento. Los estudiantes pueden replicar el experimento descrito en este artículo utilizando los materiales y procedimientos detallados, lo que les permitirá observar los resultados de primera mano. Además, el análisis de los datos obtenidos fomenta la comprensión de métodos estadísticos y la interpretación de resultados, promoviendo discusiones sobre la validez de los mismos. Se pueden proponer proyectos adicionales que amplíen el alcance de este trabajo, alentando a los estudiantes a investigar más allá del experimento original. Esto no solo mejora su comprensión del tema, sino que también desarrolla habilidades de investigación y pensamiento crítico.

Un reactor químico es un equipo diseñado para realizar una reacción química de manera controlada, con el objetivo de maximizar la conversión de reactivos y la selectividad de los productos, minimizando al mismo tiempo los costos operativos [1]. En su interior, los reactivos se introducen bajo condiciones específicas de temperatura y presión con el fin de facilitar su transformación en productos deseados mediante procesos físicos y químicos. [2]

En la ingeniería química, los reactores se clasifican principalmente en función del flujo de los fluidos, distinguiéndose entre reactores de flujo continuo y reactores de flujo discontinuo. Los reactores de flujo continuo son aquellos en los que los reactivos se alimentan y los productos se retiran de manera continua durante todo el proceso. Uno de los modelos más representativos de este tipo de reactor es el reactor de flujo pistón (RFP), el cual opera con un flujo unidireccional axial a través de un tubo, sin mezcla significativa en la dirección del flujo, configuración que da lugar a un perfil de concentración que varía a lo largo del reactor [3].

Modelos de flujo

El flujo de fluidos en un reactor es un aspecto fundamental que determina el comportamiento y la eficiencia de un proceso de reacción química [4]. En los modelos ideales, se asume un comportamiento uniforme y predecible del fluido dentro del reactor. Sin embargo, en la práctica, los reactores suelen comportarse de manera no ideal debido a una serie de factores que afectan la distribución y el transporte del fluido, lo que puede alterar significativamente la eficiencia de la reacción [5].

Los efectos de pared se refieren a la influencia de las superficies del reactor sobre el flujo del fluido. Estos efectos pueden generar una desaceleración del fluido cerca de las paredes, lo que altera la velocidad y la distribución de las concentraciones a lo largo del reactor [6][7].

Además, la proximidad de las paredes puede inducir fenómenos de acumulación de fluidos, lo que puede favorecer la formación de zonas con mayor concentración de productos o reactivos, afectando la homogeneidad del proceso [8].

La dispersión axial, por otro lado, describe la tendencia del fluido a difundir hacia adelante o hacia atrás a lo largo del reactor debido a variaciones en la velocidad del fluido [9]. Este fenómeno provoca un comportamiento menos predecible en términos de la distribución de las concentraciones de reactivos y productos, lo que reduce la eficiencia de la reacción al permitir que algunas porciones del fluido reaccionen más lentamente que otras [10].

Estos efectos son características comunes en los reactores reales, y a medida que los reactores se escalan o se diseñan con geometrías más complejas, los fenómenos no ideales se vuelven más pronunciados, lo que hace necesario el uso de modelos avanzados para describir el flujo de los fluidos y predecir el comportamiento de la reacción en condiciones reales [4]. Por lo tanto, comprender y mitigar estos efectos es crucial para mejorar la eficiencia y la seguridad de los procesos industriales de reacción química.

Tiempo de residencia

Conocer el tiempo promedio que las partículas permanecen en el interior de un reactor es fundamental para comprender el comportamiento de los reactivos y productos a lo largo del proceso de reacción, pues este tiempo influye directamente en la conversión de los reactivos, la formación de productos y la eficiencia global del proceso. De esta manera, surge el concepto de tiempo de residencia para cuantificar el tiempo promedio que las partículas permanecen dentro de un reactor.

En reactores no ideales, dicho tiempo no es homogéneo, lo que puede generar distribuciones de tiempo no uniformes debido a fenómenos del flujo, lo que significa que algunas porciones del fluido pueden pasar por el reactor más rápidamente que otras, afectando la eficiencia de la conversión y la selectividad de los productos. Bajo este contexto, la distribución del tiempo de residencia, conocida como función de distribución de tiempo de residencia $E(t)$ representa la fracción de fluido que abandona el reactor después de haber permanecido un tiempo específico.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t) dt} \quad (1)$$

Donde:

$E(t)$: Función de distribución del tiempo de residencia.

$C(t)$: Concentración del trazador en la salida del reactor en el tiempo t .

$\int_0^{\infty} C(t) dt$: Área bajo la curva de concentración versus tiempo, que normaliza $E(t)$ para que su integral total sea 1.

Los métodos experimentales más simples y directos para determinar la curva de distribución del tiempo de residencia utilizan un trazador no reactivo. En este caso, se introduce una sustancia que no participa en la reacción química y cuya concentración se puede seguir a lo largo del tiempo para determinar cómo se distribuye en el reactor. Entre los métodos más comunes, destacan los experimentos de pulso, que consisten en inyectar una cantidad pequeña de trazador en el sistema de manera repentina, observando cómo se distribuye a lo largo del reactor [3].

En reactores no ideales, esta distribución se extiende, y su forma depende de la geometría del reactor y las características del flujo, por lo que la curva de distribución del tiempo de residencia resultante no sigue una distribución simétrica. Para modelar estas distribuciones asimétricas, se recurre a funciones más flexibles, como la distribución de Weibull, ampliamente utilizada en sistemas no ideales. La función de densidad de probabilidad de la distribución de Weibull está definida por:

$$E(t)_{\text{Weibull}} = a \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}, t \geq 0 \quad (2)$$

De manera que:

- a**: Parámetro de normalización, que ajusta la magnitud total de la curva.
- b**: Parámetro de escala temporal, relacionado con el tiempo promedio de residencia.
- c**: Parámetro de forma, que define la asimetría de la distribución.

En la práctica, controlar el tiempo de residencia es necesario para optimizar las condiciones de operación del reactor, garantizando que los reactivos tengan suficiente tiempo para alcanzar la conversión deseada sin que el proceso se vuelva innecesariamente largo o costoso. Además, el tiempo de residencia influye en la escala del reactor, ya que, para grandes volúmenes de producción, es necesario ajustar el caudal y el volumen del reactor para mantener tiempos de residencia adecuados para la conversión completa o deseada de los reactivos [11].

Objetivos de la investigación

- Seleccionar el trazador más adecuado, evaluando diversas sustancias en función de su compatibilidad con el montaje experimental, para permitir una medición rápida del tiempo de residencia sin interrupciones en el flujo continuo.
- Establecer la relación entre el voltaje aplicado y el caudal entregado por una bomba peristáltica dosificadora, a través de mediciones experimentales, para lograr un control preciso del flujo de agua.
- Programar la adquisición de datos en tiempo real del sensor de luz LDR utilizando un Arduino UNO, mediante un montaje experimental adecuado.
- Construir una curva de calibración, utilizando soluciones de concentraciones de entrada conocidas, para tener la correlación entre las lecturas del sensor fotorresistor con las concentraciones de salida del trazador.
- Desarrollar una aplicación en MATLAB App Designer para obtener la curva de distribución del tiempo de residencia, con el fin de facilitar el análisis en tiempo real en un flujo continuo del reactor.
- Analizar la respuesta dinámica del reactor, introduciendo el trazador bajo diferentes caudales y concentraciones, para observar las variaciones en el tiempo de residencia.

Diseño experimental

Para el desarrollo del proyecto, se seleccionó una bureta de 50 mL para permitir un flujo constante de solvente y simular un reactor continuo. Se utilizó un colorante alimentario rojo como trazador por su bajo costo y estabilidad. Este colorante se diluyó en agua filtrada para evitar daños en las mangueras y la bomba.

Para la detección del trazador, se establecieron dos requisitos: una frecuencia de muestreo adecuada y medición en tiempo real. Se diseñó un detector de cambios en la luminosidad con un LED y un sensor LDR, dispositivos económicos y versátiles que permitieron obtener datos en tiempo real sobre los cambios de coloración del solvente [12].

Fase 1. Calibración del sistema de distribución de agua

Para asegurar un flujo de agua controlado, se empleó una bomba peristáltica dosificadora de la marca Grothen de 24 voltios, junto con mangueras de suero de 2 mm de diámetro interno. El sistema eléctrico fue alimentado por una fuente de poder Trygon Electronics, y el monitoreo del voltaje aplicado se realizó con un voltímetro AstroAI WH5000A. Se variaron los voltajes dentro del rango operativo de la bomba (16 a 24 V) y se registró el tiempo necesario para llenar un volumen de 40 mL en la bureta. El caudal volumétrico se determinó utilizando la relación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

donde V es el volumen conocido en mililitros y t es el tiempo medido en segundos. Para cada valor de voltaje, se realizaron tres mediciones independientes de caudal, calculando el promedio de los valores obtenidos. De esta forma, se obtuvo una ecuación de ajuste lineal que describe el caudal entregado en función del voltaje aplicado. Esto se aprecia en la Figura I.

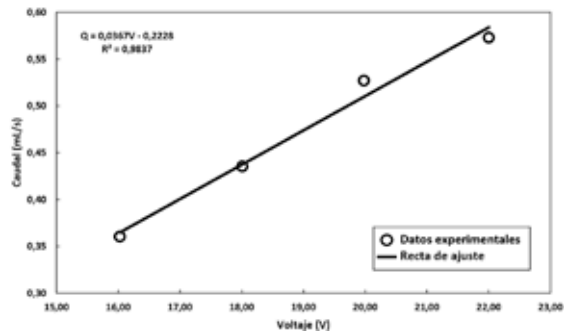


FIGURA I

Curva de calibración de la bomba peristáltica Grothen.

Fase 2. Diseño de un sistema de detección de cambios de luminosidad

Un método efectivo para monitorear la concentración de trazadores en tiempo real consiste en emplear sensores ópticos basados en la detección de cambios en la intensidad de la luz, los cuales pueden ser relacionados con la presencia y concentración del trazador en el flujo [13]. Esta idea se sustenta en la interacción entre la luz y la materia, donde la absorción, dispersión y transmisión de la luz dependen de las propiedades ópticas del medio a través del cual pasa [14].

En otras palabras, los cuerpos de color rojo, como el colorante utilizado, absorben principalmente longitudes de onda entre 490 y 580 nm, correspondientes al color verde, su color complementario. Esta interacción genera una mayor absorción de luz verde y, por ende, una mayor atenuación de la luz reflejada o transmitida hacia el sensor. Dicho efecto se explica mediante la Ley de Lambert - Beer que relaciona la cantidad de luz absorbida y la cantidad de luz transmitida en una especie en función de su concentración y longitud. Este fenómeno aumenta la sensibilidad del sistema y mejora la precisión de la medición de la concentración del colorante al reducir la interferencia de otros componentes que puedan absorber luz en otras longitudes de onda. Esta variación en la intensidad de la luz es lo que permite detectar con precisión los cambios en la concentración de los fluidos que atraviesan la bureta [15].

En cuanto al sensor LDR, es relevante mencionar el fenómeno del efecto fotoeléctrico, que se refiere a la emisión de electrones cuando una radiación electromagnética incide sobre un material. Gracias a este efecto, al aumentar la cantidad de luz que recibe el LDR, su resistencia disminuye, lo que permite que fluya una mayor corriente hacia el Arduino. En consecuencia, la absorción de luz por parte del LDR provoca un cambio en la conductividad eléctrica del material, lo que permite detectar variaciones en la intensidad lumínica [16].

El sistema del LED y sensor encapsulado (Figura II) se conectó a un microcontrolador Arduino, que registró los datos a intervalos regulares cada décima de segundo (Figura III).



FIGURA II

Diseño del sistema de detección de cambios de luminosidad
(Pieza de PLA, LED blanco y sensor fotoresistor)

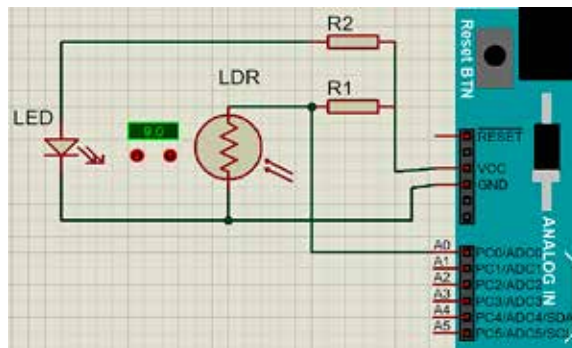


FIGURA III

Cableado del arduino

Nota: el diagrama fue realizado en Software Protheus

Dado que los datos obtenidos del Arduino corresponden a lecturas del sensor y no a las concentraciones de salida del trazador, se realizó una curva de calibración para el sistema de detección de cambios de luminosidad. Este procedimiento consistió en introducir cada solución preparada, concentraciones establecidas en la Tabla I, en el reactor y con el sensor previamente activado, se recolectaron las lecturas a las concentraciones respectivas.

A continuación, en la Figura IV se muestra el montaje experimental final del reactor.



Fase 3. Estandarización de las soluciones de trazador

Dado que los datos obtenidos del Arduino corresponden a lecturas del sensor y no directamente a las concentraciones del colorante en el efluente, se elaboró una curva de calibración para correlacionar estas lecturas con las concentraciones de salida del colorante. Este procedimiento consistió en introducir soluciones preparadas con concentraciones conocidas, como se muestra en la Tabla I, en el reactor.

TABLA I

Concentraciones de las soluciones de colorante alimentario diluidas en agua

Solución	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Concentración (mg/mL)	1,1109	0,3703	0,1230	0,0823	0,0411	0,0137	0,0046	0,0015	0,0005

Para la preparación de las diferentes concentraciones, se utilizó el método de diluciones seriadas. Partiendo de una solución madre al 10% m/v (mg/mL)

El factor de dilución se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$F = \frac{V_p}{V_f + V_p} = 0.333 \quad (4)$$

donde V_p es el volumen de paso, que se mantuvo fijo en 5 mL, y V_f es el volumen de solvente, que se mantuvo en 10 mL.

A partir del factor de dilución y conociendo la concentración de la solución madre, se procedió a calcular las concentraciones de las diluciones sucesivas utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{i+1} = C_i \cdot F \quad (5)$$

donde C_i es la concentración anterior y F es el factor de dilución.

A continuación, se presenta la curva de calibración obtenida a partir de los datos experimentales.

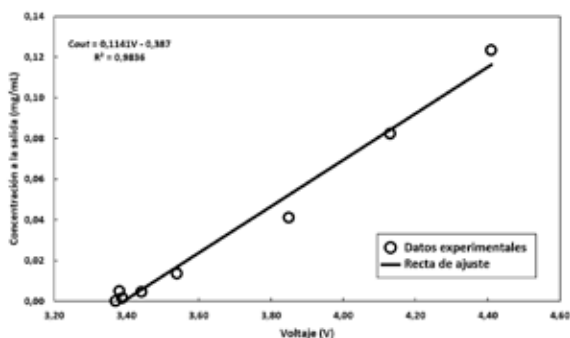


FIGURA V

Curva de calibración del colorante

Fase 4. Desarrollo de una aplicación en MATLAB App Designer para determinar el tiempo de residencia del trazador

Se utilizó un microcontrolador Arduino con un sensor LDR para medir las variaciones en la intensidad lumínica, que corresponden a la concentración del trazador en el sistema. Se programó un sistema de muestreo a intervalos de 0,1 segundos para garantizar la precisión en la recolección de datos. Las mediciones se almacenaron en un arreglo dinámico que se ampliaba automáticamente con nuevos datos, permitiendo registrar la evolución de la concentración del trazador sin interrupciones.

La aplicación desarrollada tenía la capacidad de representar gráficamente los datos en tiempo real, generando una curva que mostraba la variación de la intensidad luminosa en función de la concentración del trazador. Esto permitía monitorear el comportamiento del sistema de manera inmediata. Después de recolectar los datos, se ajustaron a un modelo matemático de Weibull, conocido por describir distribuciones con colas largas y asimétricas, comunes en sistemas de flujo de reactores continuos. Este ajuste proporcionó una representación precisa de la distribución temporal del trazador. Finalmente, se consideró el tiempo espacial como una variable clave para analizar el tiempo de residencia del trazador, relacionado con la geometría y las características del flujo dentro del reactor.

Fase 5. Inicio de la experiencia. Inyección del trazador.

Primero, se conectó una computadora al arduino para recibir los datos percibidos por el sensor; se encendió la bomba y se estabilizó el reactor hasta lograr un estado estacionario del sistema. Posteriormente se midió con una pipeta volumétrica de 1 mL una alícuota de este volumen de la solución a la concentración escogida; esta muestra se agregó por la parte superior del reactor al sistema de la bureta al mismo tiempo que se inició la grabación en la aplicación desarrollada en MATLAB para la recolección y procesamiento de datos.

Fase 6. Repetición de la experiencia.

Para verificar el comportamiento del reactor, se decidió realizar la experimentación inicialmente fijando el caudal y variando las concentraciones del trazador. Posteriormente, se procedió a fijar la concentración y variar el caudal suministrado a la bureta. Con el propósito de comparar los resultados obtenidos, se repitió el procedimiento descrito en el paso anterior, sobre inicio de la experiencia e inyección del trazador, utilizando los parámetros establecidos previamente, realizando cada experimento por triplicado. En la Tabla II se presentan los parámetros de las variables comparadas:

TABLA II

Definición de los parámetros estudiados

Concentraciones (mg/mL) utilizadas con un caudal fijo de 0,36 mL/s.	Valores de caudal (mL/s.) utilizados a una concentración fija de 1,1109 mg/mL
1,1109	0,36
0,3703	0,57

Resultados y discusiones

Para los resultados por triplicado de la experiencia con caudal definido a un voltaje de 0,36 mL/s y concentración de 1,1109 mg/mL se muestra la Figura VI.

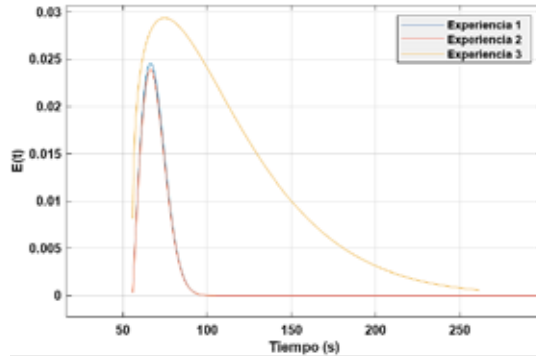


FIGURA VI

Curva de la lectura bruta del sensor con caudal 0,36 mL/s y concentración de trazador 1,1109 mg/mL en tiempo real.

En la Figura VII se presentan los resultados obtenidos con la distribución de Weibull para el tiempo de residencia con caudal definido a un voltaje de 0,36 mL/s y concentración de 1,1109 mg/mL.

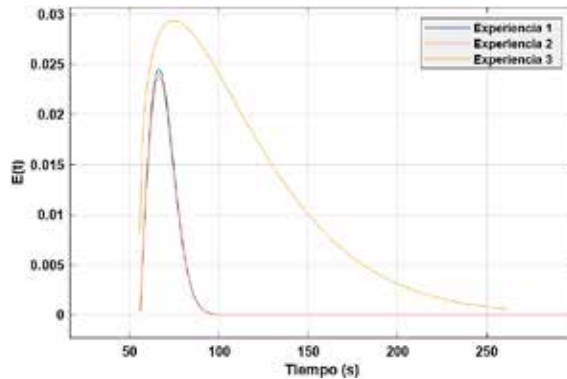


FIGURA VII

Distribución de Weibull para el tiempo de residencia con caudal 0,36 mL/s y concentración de trazador 1,1109 mg/mL

La Figura VIII ilustra los resultados por triplicado del experimento cuyos parámetros definidos fueron el caudal determinado a 0,57 mL/s y la concentración del trazador a 1,1109 mg/mL.

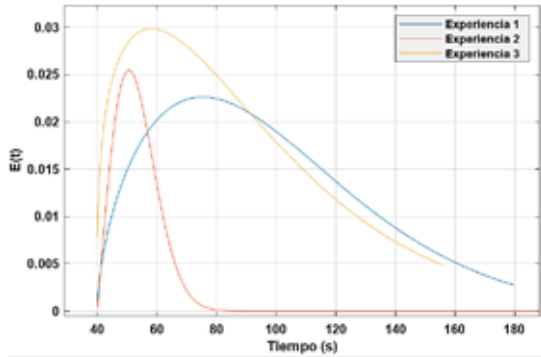


FIGURA VIII

Curva de la lectura bruta del sensor con caudal 0,57 mL/s y concentración del trazador 1,1109 mg/mL en tiempo real.

En la Figura IX se presentan los resultados obtenidos aplicando la distribución de Weibull para el tiempo de residencia, con un caudal establecido a un voltaje de 0,57 mL/s y una concentración de 1,1109 mg/mL.

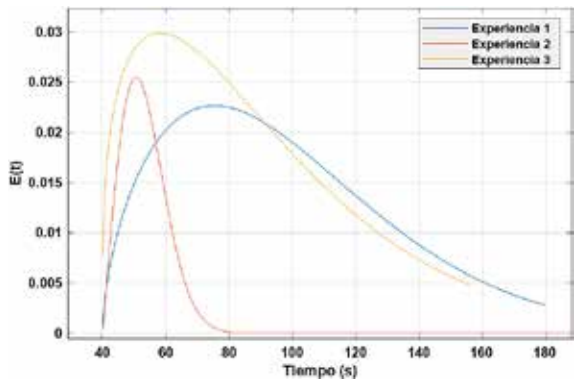


FIGURA IX

Distribución de Weibull para el tiempo de residencia con caudal 0,57 mL/s y concentración del trazador 1,1109 mg/mL .

Para los resultados de las tres experiencias realizadas con el caudal definido a 0,36 mL/s y la concentración inicial del trazador a 0,3703 mg/mL, se desarrolló el gráfico mostrado como Figura X.

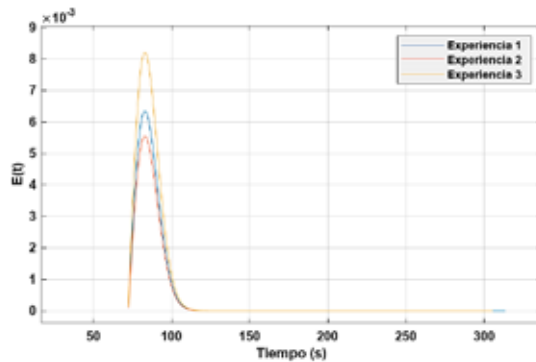


FIGURA X

Curva de la lectura bruta del sensor con caudal 0,36 mL/s y concentración del trazador 0,3703 mg/mL en tiempo real.

La distribución de Weibull para el tiempo de residencia de las experiencias con caudal definido de 0,36 mL/s y concentración inicial del trazador de 0,3703 mg/mL, se muestra en la Figura XI.

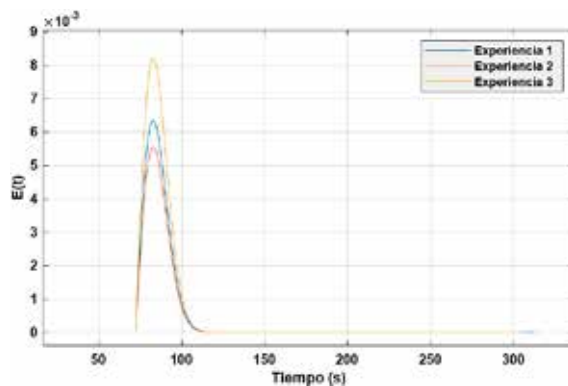


FIGURA XI

Distribución de Weibull para el tiempo de residencia con caudal 0,36 mL/s y concentración del trazador 0,3703 mg/mL .

TABLA III

Desviación estándar, varianza y error porcentual para un caudal de 0,36 mL/s, variando las concentraciones.

Caudal 0,36 mL/s (20V)				
Concentración trazador (mg/mL)	Tiempo de residencia (s)	Desv. Estándar (s)	Varianza (s ²)	Error porcentual %
1,1109	84,99	6,949	48,29	10,42
	84,99	6,949	48,29	10,42
	111,9	44,03	1938	17,93
Promedio	93,96	19,31	678,19	12,92
0,3703	108,6	6,949	48,29	14,45
	78,09	6,949	48,29	17,69
	85,59	6,949	48,29	9,788
Promedio	90,76	6,949	48,29	13,976

TABLA IV

Desviación estándar, varianza y error porcentual para un caudal de 0.537 mL/s y una concentración de 1,1109 mg/mL.

Caudal 0,573 mL/s (22V)				
Concentración trazador (mg/mL)	Tiempo de residencia (s)	Desv. Estándar (s)	Varianza (s ²)	Error porcentual %
1,1109	108	383	1467	23,72
	78,49	6,949	48,29	10,05
	91,27	39,6	1568	4,59
Promedio	92,59	143,18	1027,76	12,79

Para conocer el caudal de agua de una bomba Grothen de 24 V se trabajó en un rango óptimo donde el caudal fuera constante y la potencia de la bomba no se viera comprometida por el recalentamiento del sistema. Se pudo observar que en el rango entre los 16 V y los 0,57 mL/s, el trabajo de la bomba era ideal para obtener una correlación (R^2) muy cercano a 1, que

se ajusta al comportamiento de una línea recta. Ya para la experiencia final, se decidió trabajar entre un caudal para los 0,36 mL/s y 0,57 mL/s donde el funcionamiento de la bomba siempre fue eficiente sin comprometer el caudal.

Con respecto a la curva de calibración del colorante (Figura V), se graficó el voltaje leído por el sistema de detección de cambios de luminosidad en el eje X vs la concentración de la solución en el eje Y, con el fin de utilizar la ecuación de la recta obtenida en dicho gráfico para calcular la concentración de salida leída por el sistema de detección de la experiencia con el trazador.

Inicialmente, se graficaron once puntos, incluyendo la solución madre (10% m/V), nueve diluciones en serie y agua, representando el voltaje más pequeño medido. La gráfica mostró dos comportamientos: las soluciones de mayor concentración seguían una tendencia polinómica, mientras que las de menor concentración seguían una tendencia lineal. Se decidió eliminar las tres soluciones de mayor concentración, ya que no eran necesarias para las mediciones del sistema de detección de cambios de luminosidad. Finalmente, se obtuvo una gráfica con ocho puntos (siete diluciones y agua), denominada Curva de Calibración del colorante, que mostró un comportamiento lineal con un R^2 de 0,9836, indicando una buena afinidad con los puntos experimentales.

Una vez elaborada la gráfica de concentración en función del voltaje leído por el sistema de detección de cambios de luminosidad y la del caudal en función del voltaje, se procedió a realizar la experiencia con el trazador. Se realizaron 3 experiencias en total: el trazador con concentración de 1,1109 mg/mL (solución A) y 0,36 mL/s para el caudal, trazador con concentración de 1,1109 mg/mL (solución A) y 0,57 mL/s para el caudal, y trazador con concentración de 0,3703 mg/mL (solución B) y 0,36 mL/s para el caudal. Y se elaboraron los gráficos correspondientes, en los que se graficó en el eje X el tiempo transcurrido y en el eje Y la lectura del sensor LDR.

Adicionalmente, cada experiencia se realizó y graficó por triplicado. En cada gráfica se observan tres curvas por este motivo, estas curvas muestran una diferencia entre sí gracias a la falta de estabilidad del caudal suministrado por la bomba, ya que a pesar de mantener el voltaje al repetir por triplicado cada experiencia, a lo largo del trabajo experimental se observó como la bomba surtía un mayor o menor caudal con el paso del tiempo, se considera que esto ocasiona esa diferencia entre las tres curvas en cada gráfica, ya que el resto de los parámetros eran controlables y se mantuvieron constante. Este cambio de caudal tuvo presencia a lo largo de cada experiencia a pesar de esperar tres minutos

El uso prolongado de la bomba causó un leve calentamiento, lo que afectó la repetibilidad de los resultados de las experiencias. El calentamiento disminuye la eficiencia de la bomba, ya que parte de la energía se convierte en calor, reduciendo el caudal suministrado [17]. La temperatura afecta la estabilidad operativa y la presión generada, impactando los resultados y su repetibilidad, especialmente al realizar triplicados de cada experiencia en estado estacionario.

Las tres experiencias mencionadas anteriormente: trazador con concentración de 1,1109 mg/mL (solución A) y 0,36 mL/s para el caudal, trazador con concentración de 1,1109 mg/mL (solución A) y 0,57 mL/s para el caudal, y trazador con concentración de 0,3703 mg/mL (solución B) y 0,36 mL/s para el caudal. Se relacionarán en dos casos distintos para su análisis:

Caso 1: Caudal variable manteniendo concentración. Para esta experiencia se usó la concentración A (1,1109 mg/mL) para el 1 mL del trazador y el caudal se varió al cambiar el voltaje de 0,36 mL/s a 0,57 mL/s. En la Figura VI se observa el comportamiento del trazador para 0,36 mL/s, mientras que en la Figura VIII se observa el comportamiento del mismo trazador, pero a 0,57 mL/s. Después en la Figura VII y IX respectivamente se realiza la distribución de Weibull para modelar los datos obtenidos en cada experiencia.

Caso 2: Concentración variable manteniendo caudal. Para esta experiencia se usó un voltaje fijo de 0,36 mL/s para el caudal y se varió la concentración del trazador, usando A (1,1109 mg/mL) en una oportunidad y B (0,3703 mg/mL) en otra oportunidad. La mayor concentración (A: 1,1109 mg/mL) con 0,36 mL/s para el caudal se muestra en la Figura VI y la menor concentración (B: 0,3703 mg/mL) también con 0,36 mL/s para el caudal se muestra en la Figura 12. Posteriormente se observa su distribución Weibull en la Figura VII y XI respectivamente.

Empezando con el caso 1, en la Figura VI (gráfico de concentración A: 1,1109 mg/mL con 0,36 mL/s para el caudal) se observa en la Tabla III que el tiempo de residencia para las tres repeticiones es en promedio 93,96 seg, mientras que para la Figura VIII (concentración A: 1,1109 mg/mL con 0,57 mL/s para el caudal) se observa en la Tabla IV que el tiempo de residencia en promedio 92,56 seg. Es decir, que a medida que se incrementa el caudal que circula por la bureta, disminuye el tiempo de residencia del trazador, esto coincide con lo esperado teóricamente, ya que el fluido pasa más rápido a través del reactor, reduciendo el tiempo que cada molécula de reactivo permanece en el sistema y por ende disminuye el tiempo de residencia [18].

En el caso 2, se observó que el tiempo de residencia promedio para una concentración de 1,1109 mg/mL es de 93,96 segundos, mientras que para una concentración de 0,3703 mg/mL es de 90,76 segundos. Esto indica que el tiempo de residencia es mayor con concentraciones más altas y menor con concentraciones más bajas, cumpliendo una relación directamente proporcional. Esto no coincide con lo esperado teóricamente, ya que el tiempo de residencia no depende de la concentración del trazador [11], estas discrepancias observadas entre los resultados teóricos y experimentales pueden estar relacionadas con errores en la experiencia tales como la falta de caudal constante suministrado por la bomba y su recalentamiento. Sin embargo, se aprecia que la diferencia entre ambos tiempos no es muy grande.

En la Figura VI, se observa que el tiempo de residencia para las tres repeticiones está entre 175 y 225 segundos. Sin embargo, la Tabla 3 muestra un tiempo de residencia promedio de 93,96 segundos calculado mediante la distribución de Weibull, que ajusta los datos modelando

un crecimiento acelerado seguido de una larga cola. Esta distribución se eligió por su similitud con los datos experimentales. Comparando este tiempo de residencia con el tiempo espacial (T_{ao}), se obtiene un error del 12,92%, indicando que el reactor se comporta de manera cercana a un ideal. Los efectos de difusión y fricción en las paredes son bajos debido a la mayor superficie relativa en contacto con el fluido y el flujo laminar, lo que reduce la resistencia al movimiento del fluido.

En las tres experiencias realizadas existe una diferencia entre el tiempo de resistencia visualizado directamente en el gráfico (momento en el que la lectura del sistema de detección de cambios de luminosidad se mantiene constante) en comparación con el calculado por medio de la distribución de Weibull, como se comentó anteriormente esto puede ocurrir porque el ajuste no es perfecto para la curva, aunque sí representa una muy buena aproximación, y eso sin considerar el error visual al momento de leer el gráfico y definir el tiempo en el que se mantiene constante.

Por último, la desviación estándar y la varianza tampoco es muy significativa para las tres experiencias (detalladas en tabla 3 y 4), para la desviación estándar se obtuvo un promedio de 19,31 seg, 6,949 y 143,18 seg respectivamente la única alta es la última y esto se debió a una de las repeticiones en las que la bomba estaba fallando y por ende se obtuvieron resultados no muy confiables para esa repetición, afectando la desviación estándar de esa última experiencia. Para la varianza se obtuvo un promedio de 678,19 s^2 , 48,29 s^2 y 1027,76 s^2 respectivamente, los dos resultados elevados también se deben a una medición en la que la bomba no mantenía el caudal constante, por lo que la repetibilidad de las experiencias se dificultó.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado la viabilidad de utilizar un reactor de flujo pistón (RFP) a escala de laboratorio para caracterizar la distribución del tiempo de residencia (RTD) en sistemas no ideales.

La implementación de un sistema de adquisición de datos en tiempo real, basado en un Arduino UNO y una aplicación desarrollada en MATLAB App Designer, permitió obtener mediciones precisas y confiables.

Se validó el uso de la distribución de Weibull para modelar el comportamiento no ideal del reactor, observándose que el aumento del caudal, de 0,36 mL/s a 0,57 mL/s, redujo el tiempo promedio de residencia.

Las curvas de calibración del caudal y del sistema de detección de cambios de luminosidad mostraron un alto grado de confiabilidad ($R^2 = 0.9836$ y $R^2 = 0.9837$, respectivamente), aunque se identificaron limitaciones relacionadas con la estabilidad del caudal debido al calentamiento

de la bomba, lo que subraya la necesidad de controlar factores operativos para garantizar la estabilidad y repetitividad del sistema.

El diseño experimental y la aplicación desarrollada proporcionan una plataforma educativa valiosa para el estudio de sistemas reactivos, permitiendo a los estudiantes replicar el experimento y analizar datos en tiempo real.

Este trabajo no solo contribuye a la comprensión de los fenómenos de RTD en reactores no ideales, sino que también destaca la utilidad de herramientas modernas en la enseñanza de la ingeniería química.

Futuras investigaciones podrían enfocarse en mejorar la estabilidad del sistema y explorar otras configuraciones de reactores para ampliar el alcance educativo de este trabajo, consolidando así su relevancia en la formación de ingenieros químicos.

Referencias

- [1] Rodgers, T. (2013). *Chemical Reaction Engineering*. https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/tom.rodgers/documents/CRE_Notes.pdf
- [2] López, I., & Borzacconi, L. (2009). *Introducción al Diseño de Reactores*. <https://boletines.exportemos.pe/recursos/boletin/RESUMEN%20CINETICA.pdf>
- [3] Levenspiel O. (1999) *Ingeniería de las reacciones químicas* https://drive.google.com/file/d/1eqjAs4cfjGCd9SsCUuMKZvJ2Qr_uZDxM/view
- [4] Fogler, S. (2006). *Models for nonideal reactors* (4.^a ed.). Pearson Education, Inc. https://public.websites.umich.edu/~essen/html/byconcept/cdchap/14chap/ECRE_CD-CH14.pdf
- [5] Liu, Z. (2014). *Physical principles of environmental systems*. https://bae.engg.ksu.edu/~zifeiliu/files/fac_zifeiliu/Zifeiliu/BAE820_16%20Type%20of%20reactors.pdf
- [6] Huang, P. Y., & Feng, J. (1995). Wall effects on the flow of viscoelastic fluids around a circular cylinder. *Science Direct*, 60(2), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0377025795013942>.
- [7] Klewicki, J., Saric, W., Marusic, I., & Eaton, J. (2007). Wall-Bounded flows. En *Springer eBooks* (pp. 871-907). https://doi.org/10.1007/978-3-540-30299-5_12

- [8] Chalmers, H., Fang, X., Addai, S., & Tachie, M. F. (2022). The effects of wall roughness on the flow dynamics behind a near-wall square cylinder. *Experiments In Fluids*, 63(8). <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03472-z>
- [9] *Dispersion in flow reactors*. (s. f.). Vapourtec. https://www.vapourtec.com/wp-content/uploads/2015/10/Vapourtec_Dispersion.pdf
- [10] Dudokovic, M. P., & Felder, R. M. (s. f.). *Mixing effects in chemical reactors*. https://classes.engineering.wustl.edu/eece503/Lecture_Notes/Module_3.pdf
- [11] Fogler, H. S. (2006). Elementos de ingeniería de las reacciones químicas (4a ed.). Pearson Educación de México. ISBN: 978-970-26-1198-1.
- [12] Román-Raya, J., Ruiz-García, I., Escobedo, P., Palma, A. J., Guirado, D., & Carvajal, M. A. (2020). Light-Dependent Resistors as Dosimetric Sensors in Radiotherapy. *Sensors*, 20(6), 1568. <https://doi.org/10.3390/s20061568>
- [13] Deetman, A., Bos, D., Blaakmeer, J., Salet, T., & Lucas, S. (2024). An in-line dye tracer experiment to measure the residence time in continuous concrete processing. *Materials And Structures*, 57(5). <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02378-y>
- [14] Jabar, M. (2022). *PROPERTIES OF LIGHT*. Recuperado 27 de noviembre de 2024, de https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/6/6_2022_10_14!01_14_27_PM.pdf
- [15] Diaz NA, Bárcena Ruiz A, Fernández Reyes E, et al. Espectrofotetría: espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Campus Universitario de Rabanales. https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf.
- [16] Porral, Edgardo & Battaglia, Gerardo. (2022). FÍSICA ELECTRÓNICA Introducción a la Física Cuántica. https://www.researchgate.net/publication/366433259_FISICA_ELECTRONICA_Introduccion_a_la_Fisica_Cuantica
- [17] Calderón, G., & Contreras, R. (2003). *ESTUDIO DE LA CAVITACIÓN EN LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS*. <https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/3613/0024437.pdf?sequence=1>
- [18] Guo, X., Fan, Y., & Luo, L. (2018). Residence Time distribution on flow Characterisation of multichannel systems: modelling and experimentation. *Science Direct*, 99, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089417771830877X?via%3Dihub>
- [19] Carrasco, J., Ortega, E., & Cordeiro, G. (2008). A generalized modified Weibull distribution for lifetime modeling. *Science Direct*, 53(2). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167947308004192>

- [20] Díaz, N., Bárcena, J. A., Galván, A., Peinado, J., Toribio, F., & Túnez, I. (s. f.). *Espectrofometría: espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf
- [21] *El efecto fotoeléctrico en un LDR Objetivo*. (2019, 2 abril). studylib.es. <https://studylib.es/doc/7162424/el-efecto-fotoel%C3%A9ctrico-en-un-ldr-objetivo>
- [22] Thibaut. (2022, 30 septiembre). *Ley de beer lambert - IMA*. IMA. <https://imamagnets.com/blog/ley-de-beer-lambert/>
- [22] Escalona, L. (2007). Determinación Experimental de la Distribución de Tiempos de Residencia en un Estanque Agitado con Pulpa . <https://www.metsolver.com/Papers/dt1.pdf>