

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE TIEMPOS DE RESIDENCIA EN UN REACTOR DE FLUJO PISTÓN NO IDEAL MEDIANTE TRAZADORES PULSADOS Y MONITOREO EN MATLAB.

JEAN P. GUARINO

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

jean.guarino@correo.unimet.edu.ve

GUSTAVO R. INCIARTE

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

gustavo.inciarte@correo.unimet.edu.ve

ANDRÉS G. LIMA

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

lima.andres@correo.unimet.edu.ve

MARÍA C. QUINTERO

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

m.quintero@correo.unimet.edu.ve

GABRIELA V. LARA

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

g.lara@correo.unimet.edu.ve

ELIANA I. ANGARITA

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

eliana.angarita@correo.unimet.edu.ve

ANDRÉS A. CROQUER

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

andres.croquer@correo.unimet.edu.ve

JESÚS A. COLMENARES

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

colmenares.jesus@correo.unimet.edu.ve

MIGUEL M. PÉREZ H.

Universidad Metropolitana,
Caracas, Venezuela

mperez@unimet.edu.ve

<https://orcid.org/0000-0002-8237-8538>

Resumen:

Los reactores de flujo pistón (RFP) son ampliamente empleados en la industria química y constituyen un pilar fundamental en la formación de ingenieros, ya que permiten estudiar el comportamiento hidrodinámico de sistemas no ideales bajo condiciones controladas. Este trabajo presenta el diseño, construcción y caracterización experimental de un reactor de flujo pistón vertical a escala de laboratorio, complementado con una aplicación desarrollada en MATLAB App Designer para la adquisición y análisis en tiempo real de datos mediante sensores de caudal, conductividad y temperatura. Utilizando el método de trazador por pulso con soluciones de NaCl, se determinó la distribución de tiempos de residencia (DTR) en un

RECIBIDO: 09-02-2026 / ACEPTADO: 11-05-2026 / PUBLICADO: 30-06-2026

Cómo citar: Guarino, et. al., (2026). Caracterización dinámica de tiempos de residencia en un reactor de flujo pistón no ideal mediante trazadores pulsados y monitoreo en Matlab. *Cuadernos Unimetanos*, 48, 2026-1, 53-82. <https://doi.org/10.58479/cu.2026.206>



rango de caudales de 1 a 15 L/min y concentraciones de 0,05 a 0,25 M. Los resultados confirman que, dentro de las condiciones estudiadas, el tiempo medio de residencia depende exclusivamente del caudal volumétrico, siendo independiente de la cantidad de trazador inyectado. Además, se obtuvo un modelo empírico racional que describe con alta precisión la relación inversa entre caudal y tiempo de residencia, facilitando estimaciones rápidas sin necesidad de nuevos ensayos. Más allá de su aporte técnico, esta propuesta constituye una herramienta pedagógica innovadora que integra experimentación física, automatización de bajo costo y procesamiento computacional, fortaleciendo competencias clave en estudiantes de ingeniería química y promoviendo una enseñanza activa, reproducible y alineada con los desafíos actuales de la educación superior. 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, distribución de tiempo de residencia (RTD, trazador por pulso, MATLAB app designer, formación en ingeniería, educación de calidad, producción y consumo responsables, innovación.

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

Este trabajo se alinea explícitamente con tres Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas:

ODS 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 con el estudio:

La propuesta constituye una plataforma educativa innovadora y accesible para la enseñanza experimental en ingeniería química, integrando experimentación física, adquisición automática de datos y análisis computacional en tiempo real. Esta experiencia fortalece competencias técnicas, digitales y analíticas en estudiantes universitarios, promoviendo un aprendizaje activo, reproducible y centrado en la resolución de problemas reales.

ODS 9 – INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

Descripción:

Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.

Relación con el estudio:

Se implementa una solución de bajo costo basada en hardware abierto (Arduino), sensores comerciales (caudalímetro, conductímetro) y software ampliamente utilizado en la industria (MATLAB), demostrando cómo tecnologías accesibles pueden modernizar los laboratorios docentes y acercar la formación académica a las prácticas industriales actuales.

ODS 12 – PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

Descripción:

Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

Relación con el estudio:

El diseño experimental optimiza el uso de recursos (agua, reactivos, energía) mediante mediciones precisas y repetibles, minimizando desperdicios. Además, al fomentar una comprensión crítica del desempeño de reactores no ideales, se cultiva desde etapas tempranas una mentalidad orientada a la eficiencia y la sostenibilidad en los futuros profesionales de la ingeniería.

CONTENIDO

Resumen	53
1. Introducción	57
2. Materiales y métodos	59
3. Resultados y discusión	63
4. Conclusiones	77
5. Recomendaciones	78
6. Bibliografía	79

1. Introducción

El tiempo medio de residencia es la medida que cuantifica la estancia de las partículas dentro de un reactor. Si el reactor es ideal, el tiempo espacial y el tiempo medio de residencia tienen la misma magnitud. Sin embargo, si se trabaja con un reactor real, las desviaciones de la idealidad como la difusividad radial, la turbulencia del fluido y las zonas muertas pueden afectar el tiempo en el que las partículas permanecen en el reactor (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999; Danckwerts, 1953). Uno de los métodos más simples para la obtención de los tiempos medios de residencia en reactores reales es el método del trazador por pulso. Hay otras técnicas de trazador, como la de trazador por escalón, escalón negativo (elusión), métodos de frecuencia-respuesta y métodos que emplean alimentaciones distintas de escalón o pulso que suelen ser más complejas de llevar a cabo que el método por pulso y no se emplean con tanta frecuencia. (Fogler, 2016 ; Nechita et al., 2023 ; Westerterp et al., 1984).

En una alimentación por pulso, se inyecta una cantidad de trazador a la corriente de alimentación en un tiempo tan breve como sea posible. Posteriormente se mide la concentración a la salida en función del tiempo. La inyección debe realizarse durante un periodo muy corto, y debe haber una cantidad despreciable de dispersión entre el punto de inyección y la entrada al sistema del reactor. Si se puede cumplir con estas condiciones, la técnica constituye un método simple para determinar la distribución de tiempo de residencia (Fogler, 2016).

El propósito de esta investigación es analizar el comportamiento hidrodinámico de un reactor de flujo pistón (RFP) vertical a través del estudio detallado del modelo de tiempo de residencia, un parámetro clave para caracterizar el desempeño de sistemas de flujo en reactores químicos. Este tipo de experiencias prácticas, basadas en hardware accesible y software interactivo, fortalecen competencias clave en la formación de ingenieros (Alam et al., 2020; Prabowo et al., 2024). Para cumplir este objetivo, se diseña y construye un reactor que permita la inyección controlada de un trazador en la entrada y la medición del caudal y la concentración en su salida.

Esta propuesta va más allá del análisis técnico: se concibe como una experiencia de laboratorio innovadora orientada a la formación de futuros ingenieros químicos. Al integrar sensores de bajo costo, adquisición automática de datos y una interfaz desarrollada en

MATLAB App Designer, se promueve un aprendizaje activo, basado en evidencia experimental y herramientas digitales accesibles. Esta estrategia didáctica contribuye directamente al Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (Educación de Calidad), al fortalecer competencias críticas en entornos universitarios mediante metodologías reproducibles y centradas en el estudiante. Asimismo, apoya el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) al demostrar cómo tecnologías de prototipado rápido y software libre pueden modernizar los laboratorios docentes, y refuerza el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) al fomentar, desde la enseñanza, una cultura de eficiencia en procesos químicos y uso racional de recursos.

A partir de los datos experimentales obtenidos, se analiza el perfil de concentración de soluciones de NaCl a lo largo del tiempo. Además, se desarrolla una interfaz gráfica en MATLAB App Designer, que permite calcular parámetros como la función de distribución de tiempos de residencia (DTR) y el tiempo medio de residencia. Por último, se establece una relación empírica entre el caudal del reactor y el tiempo medio de residencia en base a los datos experimentales obtenidos.

Aunque existen numerosos estudios que analizan el tiempo de residencia en reactores de flujo pistón mediante simulaciones computacionales, la medición experimental precisa sigue siendo un desafío debido a la dificultad de realizar un seguimiento detallado del perfil de concentración en tiempo real. Este estudio propone un enfoque experimental innovador utilizando sensores de conductividad y caudal conectados a un sistema Arduino, lo que permite una medición directa y en tiempo real del comportamiento del flujo.

Dey et al. (2007) investigaron el comportamiento de un reactor de flujo pistón (PFR) horizontal, utilizando trazadores para analizar la distribución de tiempos de residencia. En su estudio, realizaron un experimento por triplicado empleando una solución de NaCl y un colorante, inyectados en el reactor, mientras registraban las curvas de respuesta de una sonda de conductividad y un sensor de luz. Estudios posteriores han confirmado la utilidad del trazador por pulso, aunque destacan la necesidad de mayor reproducibilidad y control instrumental (Pundir, 2020). Los resultados mostraron que las curvas obtenidas tenían una alta correlación entre sí, a pesar de evidenciar un desfase entre los perfiles de sal y colorante.

Sin embargo, el estudio de Dey et al. (2007) carece de experimentación bajo diferentes condiciones de flujo, lo cual es esencial para una evaluación más integral del comportamiento hidrodinámico. Además, los autores no especifican la metodología usada para obtener las concentraciones del trazador a partir de las mediciones del conductímetro y el sensor de luz, limitando la reproducibilidad de los resultados. Por último, a nivel experimental e industrial no se suele evaluar reactores de flujo pistón (RFP) verticales. Por estas razones, se diseña una nueva experiencia que no solo aborde estas limitaciones, sino que también implemente herramientas más modernas, como MATLAB App Designer, para el análisis de datos y la simulación del proceso.

La determinación de la distribución de tiempos de residencia (DTR) en un reactor proporciona información sobre cuánto tiempo los diversos elementos del fluido han estado en el reactor. Sin embargo, la DTR no aborda la cinética de la reacción, y es necesario tener un modelo para manejar los datos de la DTR, siendo estos factores determinantes para predecir la conversión en reactores químicos (Fogler, 2016; Nauman, 2008).

Una vez caracterizado el reactor conociendo su DTR, es posible integrar estos datos con información experimental sobre la cinética de reacción y modelos de ajuste de la DTR, que permitan predecir el desempeño del reactor real para diferentes reacciones. Sin embargo, el propósito de esta investigación no es definir modelos de ajuste de DTR ni profundizar en la cinética de reacción, sino proporcionar una caracterización inicial del reactor basada en la DTR. Esta caracterización constituye un paso previo indispensable para entender el tiempo de residencia de los elementos del fluido en el reactor y, posteriormente, complementar este análisis con información adicional que permita evaluar de manera integral el desempeño del reactor.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Para la construcción del reactor, se utiliza un tubo de acrílico transparente con un diámetro interno de 7 cm, 3 mm de grosor y una longitud de 81 cm, el cual está conectado a dos cabezales de goma ajustables: uno en la parte superior y otro en la parte inferior. El cabezal inferior cuenta con dos conexiones, la primera para la entrada del fluido, que cuenta con una válvula para regular el caudal, y la segunda destinada a la introducción del trazador. El cabezal superior está diseñado para permitir la salida del fluido, asegurando así un flujo continuo dentro del reactor. Se introduce agua como fluido de trabajo a través de un sistema de tuberías conectado al cabezal inferior, el cual se construye mediante la termofusión de tuberías y accesorios de polietileno, con un diámetro externo de 2,54 cm y un diámetro interno de 2 cm.

El reactor está equipado con múltiples sensores, ubicados tanto en el tubo como en sus alrededores, para medir diversos parámetros: caudal, conductividad y temperatura. El caudal se mide utilizando un caudalímetro de tipo rotámetro, modelo YF-S201, que tiene una conexión de ½ pulgada y un rango de medición de caudal de 1 a 30 L/min. Este sensor incorpora un rotor con paletas magnéticas dentro de una cámara aislada, y un sensor de efecto Hall externo que detecta los cambios en el campo magnético producidos por el movimiento del rotor. El sensor de efecto Hall genera pulsos eléctricos que son convertidos a flujo mediante un Arduino Uno, permitiendo así la cuantificación del movimiento del rotor. Este enfoque de instrumentación accesible ha demostrado ser efectivo en laboratorios docentes de ingeniería (Visco et al., 2023; Perry & Green, 2008). El rango de voltaje de operación del caudalímetro empleado se encuentra entre los 3,5 y 12 voltios. El caudalímetro está ubicado a más de 60

mm de la salida del fluido, distancia mínima requerida para la instalación del mismo, con el fin de evitar altas fluctuaciones de lectura debido a turbulencias en la intersección de la tubería.

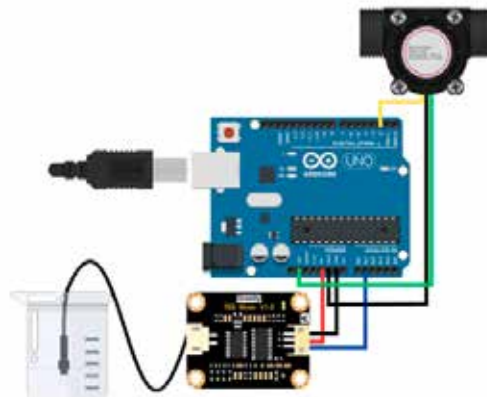
Por otro lado, la conductividad se mide con un conductímetro o sensor de conductividad TDS, que determina la cantidad de sólidos disueltos totales (TDS) en el agua, es decir, indica cuántos miligramos de sólidos solubles se disuelven en un litro de agua (ppm). Este sensor se encuentra instalado en el cabezal superior, a la misma altura que la salida del fluido. Se utiliza un sensor de conductividad con interfaz de módulo XH2.54-3P y electrodo XH2.54-2P, con un rango de medición de TDS de 0 a 1000 ppm y un margen de error de $\pm 0,1$ ppm a 25°C . Este sensor está conectado a la misma placa Arduino Uno que el caudalímetro. El rango de voltaje de operación del conductímetro empleado es de 3,3 a 5,5 voltios. Finalmente, se emplea una termocupla o termopar tipo K para registrar la temperatura de operación.

2.2. Configuración de los sensores

En la Figura 1 se presenta el diagrama de conexión del caudalímetro y el conductímetro en la placa Arduino Uno. Las conexiones del caudalímetro están representadas por los siguientes colores: amarillo (conexión de voltaje), negro (conexión a tierra) y verde (conexión de pulsos eléctricos). La conexión del voltaje se realizó en la sección *Power*, en el puerto 5V. La conexión a tierra se realizó en la sección *Power*, en el puerto GND. La conexión de los pulsos eléctricos se realizó en la sección *Digital PWM*, en el puerto 2.

Las conexiones del conductímetro están representadas por los siguientes colores: rojo (conexión de voltaje), negro (conexión a tierra) y azul (conexión de TDS). La conexión del voltaje se realizó en la sección *Power*, en el puerto 5V. La conexión a tierra se realizó en la sección *Power*, en el puerto GND. La conexión de TDS se realizó en la sección *Analog In*, en el puerto A1.

Figura 1. Conexiones de Arduino.



La calibración del caudalímetro fue realizada en un rango de 3 a 15 L/min, a través de pruebas de medición de volumen en un cilindro graduado de 2000 mililitros en un tiempo determinado. Este procedimiento determinó los valores del caudal real para obtener el factor de calibración, siendo éste 1/0.43 (relación entre el caudal dado por el caudalímetro y el caudal real).

Por otra parte, la calibración del conductímetro se realizó mediante el uso de una serie de soluciones de cloruro de sodio (NaCl) a diferentes concentraciones molares con valores de partículas por millón conocidos en un rango de 200 a 900 ppm. Las concentraciones molares empleadas fueron 0,0033 M, 0,005 M, 0,0067 M, 0,0083 M, 0,01 M, 0,012M, 0,013M y 0,015M. Los resultados del conductímetro fueron corregidos mediante la aplicación de un factor de calibración de 1/0.91 (relación entre las concentraciones en ppm medidas por el conductímetro y los valores teóricos).

2.3. Metodología empleada

El carácter de la investigación es exploratorio y descriptivo. En este caso, se abarca la investigación de un tema poco explorado, como lo es el diseño de reactores para el cálculo de tiempos de residencia. Además, es descriptivo, ya que busca describir el comportamiento de un trazador a lo largo del volumen del reactor para estimar su tiempo de residencia real.

La naturaleza de la investigación es de tipo cuantitativo, debido a que consiste en la medición de distintos parámetros para su posterior análisis. De manera que se asignan magnitudes numéricas a cada variable de estudio, tal como lo es el tiempo, la concentración y el caudal.

2.4. Técnica de medición

Para poder recopilar los datos necesarios para la construcción de la curva de simulación se trabajó con cinco soluciones de cloruro de sodio a diferentes concentraciones molares: 0,05 M, 0,10 M, 0,15 M, 0,20 M y 0,25 M. Estas soluciones fueron evaluadas en un rango de caudales que abarcó desde 1 hasta 15 L/min. Para cada combinación de caudal y concentración, se realizaron por triplicado mediciones de partículas por millón (ppm) en función del tiempo.

Para esto, en primer lugar, se realizó la medición del caudal. La programación realizada para el Arduino permite obtener 1 lectura por segundo. Estos datos de caudal fueron transferidos a MATLAB para su representación gráfica en tiempo real, lo que permitió manipular la válvula de entrada inferior hasta alcanzar el valor deseado. El caudal de trabajo fue estimado mediante el promedio numérico de 10 lecturas obtenidas.

Una vez establecido el caudal de trabajo, se procedió a tomar la muestra del trazador a utilizar. Para ello, se empleó una jeringa Grossmed de 60 mililitros para extraer una muestra de 60 mililitros de solución de NaCl, la cual sería inyectada por pulso al reactor en la tubería del cabezal inferior

Previo a la inyección del trazador, se inició la lectura de partículas por millón a una tasa de 10 mediciones por segundo. Los datos fueron transferidos a MATLAB para su representación gráfica en tiempo real. Una vez transcurrido 1 minuto, se inyectó el trazador al reactor y se dejó transcurrir el tiempo necesario para asegurar el paso completo del trazador a través del reactor. Esto se estimó al observar que la curva, una vez alcanzado su pico máximo de lectura, volviera al valor inicial y se mantuviera constante.

Los datos recopilados fueron transferidos a un archivo de formato Excel para generar la curva de simulación en el diseño de la aplicación.

2.5. Diseño de la aplicación

El diseño de la aplicación se centra en la recopilación y análisis de datos en tiempo real mediante sensores conectados a un sistema Arduino. El uso de MATLAB App Designer para interfaces educativas ha ganado relevancia por su capacidad de integrar teoría, simulación y experimentación en tiempo real (*Gupta & Yadav, 2020; MathWorks, 2024*). Las lecturas se realizan a una frecuencia de aproximadamente 10 mediciones por segundo, donde una medición corresponde al caudalímetro y las restantes al conductímetro. Para registrar el tiempo transcurrido desde el inicio del experimento, se utilizan funciones específicas de MATLAB.

La aplicación incluye una interfaz que permite al usuario seleccionar un puerto para conectar el dispositivo Arduino. Una vez establecida la conexión, esta se mantiene registrada en la aplicación. En caso de que se presente un problema de conexión, el usuario deberá reconectarse manualmente al Arduino.

La aplicación permite medir el caudal durante un tiempo indefinido, mostrando en pantalla el valor del caudal junto con una gráfica en tiempo real. Para la medición del caudal, la aplicación opera durante un intervalo de 15 segundos, calculando la media aritmética simple de los valores medidos en ese tiempo, y este caudal se presenta al usuario al finalizar la medición. En cuanto a la medición de concentración (ppm), el usuario inicia el registro de datos mediante un botón, y se registran simultáneamente las lecturas de ambas variables. Si el valor es inferior a 50, se clasifica como un dato suministrado por el caudalímetro, mientras que los valores superiores se consideran provenientes del conductímetro.

Durante la inyección del trazador, se observa un aumento súbito en el caudal, y cuando este incremento supera los 2 L/min, se registra ese momento como tiempo cero para el cálculo

del tiempo medio de residencia. Al estabilizarse la gráfica correspondiente a Conductividad (ppm) en función de tiempo, el usuario debe indicar a la aplicación que detenga el registro de datos.

En relación con los datos de concentración, la aplicación descarta puntos vacíos y lecturas previas a la inyección, para posteriormente calcular el tiempo medio de residencia. Aunque estos datos no se utilizan en el cálculo, se almacenan en la aplicación como conductividad y tiempo en estado estacionario.

El cálculo del tiempo medio de residencia se realiza utilizando el volumen constante del reactor y el caudal promedio, lo que permite determinar el tiempo espacial teórico, un valor de referencia para las comparaciones. A todos los datos de tiempo posteriores a la inyección se les resta el tiempo de inyección, estableciendo así un nuevo tiempo cero. A partir de los datos en estado estacionario, se calcula el valor promedio de la conductividad del agua alimentada, para ajustar las lecturas posteriores a la inyección restando este promedio, con el fin de obtener la concentración real de la solución empleada.

Posteriormente, se lleva a cabo una integración numérica utilizando el método de trapecios desde el tiempo cero hasta el tiempo final, lo que permite calcular la función de distribución de tiempos de residencia. Una vez completado este proceso, la aplicación presenta al usuario el tiempo espacial teórico, el tiempo medio de residencia experimental y la gráfica de $E(t)$ en función del tiempo, proporcionando una herramienta efectiva para el análisis de los datos obtenidos.

Adicionalmente, se presenta una pestaña de simulación independiente de los datos en tiempo real para el cálculo del tiempo de residencia medio. Para esto, con los datos experimentales obtenidos, se construyó una curva de tiempo medio de residencia en función del caudal, utilizando un ajuste racional para modelar la relación entre estas variables. Esta interfaz permite al usuario ingresar un caudal dentro del rango de 1 a 15 L/min y obtener una estimación del tiempo medio de residencia correspondiente, a través de la función de ajuste generada a partir de los datos experimentales.

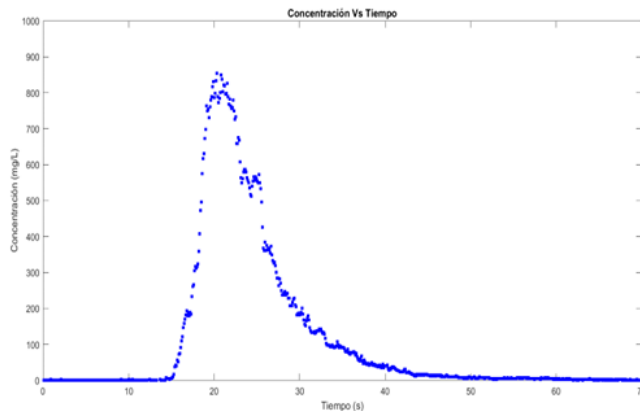
3. Resultados y discusión

3.1 Concentración en función del tiempo, función de distribución de tiempos de residencia y función de distribución acumulativa.

El método del trazador permite calcular, a través de un caudal y una cantidad de trazador conocida, el tiempo medio de residencia. Para su determinación, se debe obtener una serie de pares ordenados de tiempo y concentración, con la finalidad de generar una curva que refleje el comportamiento de la concentración del trazador en el reactor en función del tiempo (*Fogler*,

2016; Levenspiel, 1999). Idealmente, estas curvas se pueden ajustar a funciones conocidas como la gaussiana, la log-normal y la weibull. Sin embargo, a la hora de la experimentación y el ajuste de los datos, se observa que las curvas mencionadas no se adaptan a ninguna función de forma adecuada, lo cual es consistente con hallazgos previos en sistemas no ideales con dispersión axial (Mikkola et al., 2019; Alasino et al., 2015). Si alguna serie de datos consigue un ajuste relativamente acorde a lo esperado, esto no implica que otras curvas similares reproduzcan este resultado.

Figura 2. Concentración del trazador en el reactor en función del tiempo.



En la Figura 2, se representan los datos experimentales obtenidos para la concentración del trazador (mg/L) en función del tiempo (segundos) en una de las pruebas realizadas. La gráfica muestra un comportamiento característico de un sistema de flujo pistón (RFP), donde se observa un incremento inicial de la concentración hasta alcanzar un pico máximo, seguido de un descenso progresivo. Este comportamiento refleja la distribución temporal de las moléculas del trazador a medida que ingresan, transitan y salen del reactor (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999).

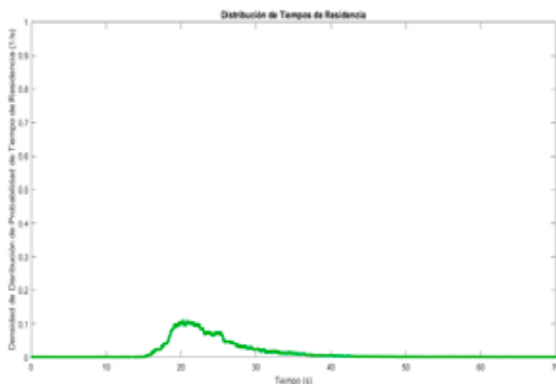
Además de conocer la curva de concentración en función del tiempo, es importante determinar con los datos experimentales, la función de distribución de tiempos de residencia, también conocida como $E(t)$. Esta función se puede expresar según Fogler y Levenspiel como:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} = \frac{C(t) \cdot v_0}{N_0} \quad [1]$$

donde N_0 es el número de moles inyectado y v_0 es el caudal de entrada del reactor, el cual en este caso es el mismo de salida debido a que no hay reacción química, se desprecian las caídas de presión y las variaciones de temperatura. Como se puede apreciar en esta ecuación,

la distribución de los tiempos medios de residencia es función de la curva de concentración en función del tiempo, del caudal inicial y del número de moles de entrada.

Figura 3. Función de distribución de tiempos de residencia.

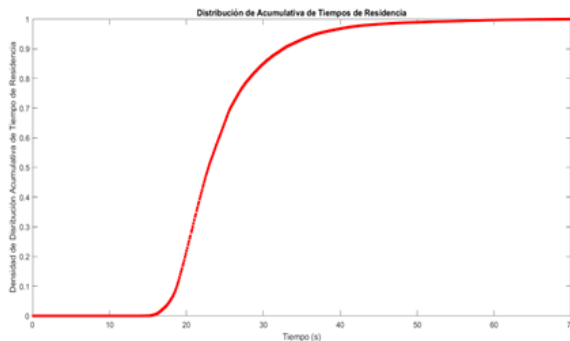


La Figura 3, muestra la distribución de tiempos de residencia experimental, representada como una densidad de probabilidad en función del tiempo (s). La distribución de tiempos de residencia varía de 0 a 1 debido a que se trata de probabilidad. Este análisis estadístico permite identificar la probabilidad de que las partículas permanezcan en el reactor durante un intervalo de tiempo específico.

Igualmente, otro concepto importante a tener en cuenta en este tipo de reactores no ideales es la función acumulativa de distribución de tiempo de residencia, la cual se puede expresar como:

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad [2]$$

Figura 4. Función acumulada de distribución de tiempos de residencia.



La función acumulada obtenida es monótona no decreciente, lo cual es una propiedad intrínseca de las funciones de distribución acumulativa. Esto significa que, a medida que el tiempo aumenta, $F(t)$ nunca disminuye. Esto se observa en la Figura 4, donde la curva siempre asciende hasta volverse asintótica en la probabilidad de 1 (Fogler, 2008; Levenspiel, 1999).

En la región inicial, correspondiente al intervalo de tiempo entre 0 y 20 segundos, se observa una pendiente baja en la curva, lo que indica un crecimiento lento de la probabilidad acumulada. Esto sugiere que la mayoría de las partículas se encuentran en el reactor. Entre 20 y 50 segundos, la curva experimenta un incremento más pronunciado, lo que caracteriza la región de transición. En esta zona, se concentra la mayor parte de los tiempos de residencia, evidenciando que este intervalo es el más representativo del sistema. Finalmente, para tiempos mayores a 50 segundos, la curva se aproxima asintóticamente al valor máximo de probabilidad acumulada. Esto indica que, en este intervalo, toda la probabilidad acumulada ha sido alcanzada, lo que implica que no quedan partículas trazadoras dentro del reactor.

3.2 Determinación de los tiempos de residencia.

Para calcular el tiempo de residencia del trazador en el reactor, teóricamente, se recomienda ajustar la curva de la concentración a una función conocida; sin embargo, para efectos de este trabajo se utilizó el método de los trapecios, función que en MATLAB es conocida como “cumtrapz”. Se decidió aplicar este método de cálculo debido a que las gráficas tienen un comportamiento creciente, pronunciado y con picos que dificulta el ajuste a alguno de los modelos existentes. Por consiguiente, a través de integración numérica, se calculó el tiempo medio de residencia con la siguiente ecuación:

$$DTMR = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad [3]$$

Figura 5. Concentración en función del tiempo con ajuste de función de Weibull.

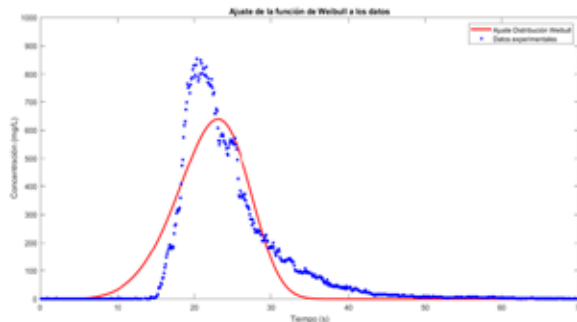


Figura 6. Concentración en función del tiempo con ajuste de función de Lognormal.

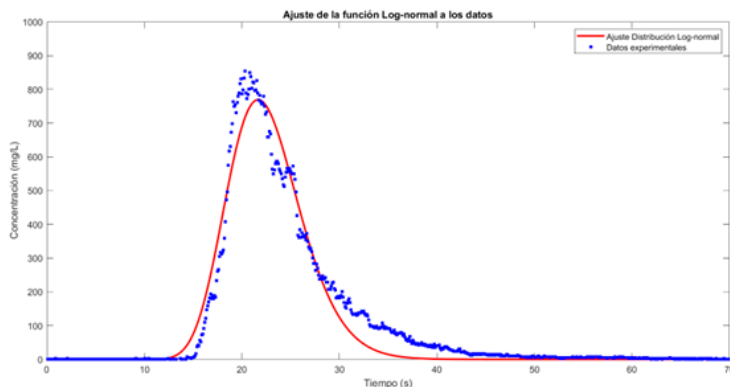
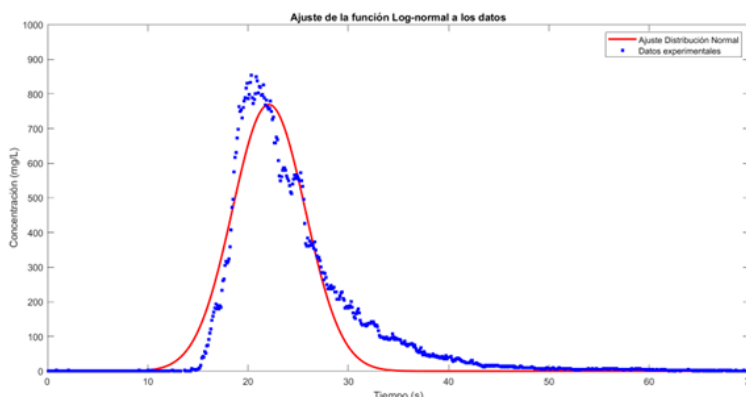


Figura 7. Concentración en función del tiempo con ajuste de función de Normal.



En las Figuras 5, 6 y 7 se implementaron ajustes utilizando las distribuciones Weibull, normal y lognormal, respectivamente, con el objetivo de evaluar su capacidad de representar los datos experimentales de concentración en función del tiempo. En la Figura 5, el ajuste con la función Weibull muestra explícitamente que, aunque esta distribución puede modelar ciertos comportamientos asimétricos, no logra capturar adecuadamente el pico ni la dispersión de los datos experimentales en su totalidad. Este resultado indica que la función Weibull no es óptima para describir este conjunto específico de datos.

En la Figura 6, se observa el ajuste de la distribución log-normal, la cual presenta un desempeño notablemente superior al de la distribución Weibull en términos de aproximación a los datos experimentales. Este modelo logra captar la asimetría característica de la distribución de las concentraciones en función del tiempo, representando de manera adecuada tanto el

ascenso como el descenso de la curva alrededor del pico principal. Sin embargo, también se evidencian discrepancias en las colas de la distribución, sobre todo en la región de menor concentración.

En la Figura 7 se presenta el ajuste de los datos experimentales mediante una distribución normal. A simple vista, se observa que la naturaleza simétrica de la función normal limita considerablemente su capacidad de representar adecuadamente los datos experimentales, los cuales exhiben un comportamiento asimétrico. De modo que para los cálculos posteriores se decidió utilizar el método de integración numérica por el método de trapecios, debido a la cantidad de números experimentales tratados.

3.3 Varianza, desviación estándar y su interpretación física.

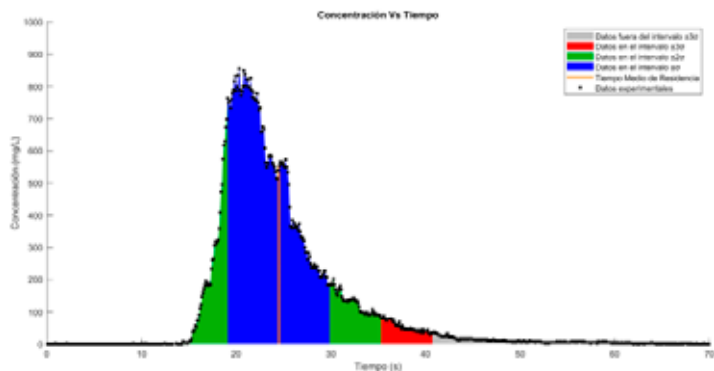
La varianza es una medida clave para analizar la dispersión de los tiempos de residencia en un sistema, indicando qué tan alejados están estos valores respecto al tiempo promedio. Matemáticamente, se define como:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \text{trm})^2 \cdot E(t) dt$$

donde $E(t)$ es la función de densidad de probabilidad de la distribución del tiempo de residencia (Fogler, 2008). En términos físicos, una varianza elevada sugiere una mayor heterogeneidad en el flujo, lo que podría deberse a fenómenos como recirculación o dispersión significativa, mientras que una baja varianza refleja una mayor uniformidad, característica de sistemas más cercanos al comportamiento ideal. Por otro lado, la desviación estándar se define como la raíz cuadrada de la varianza (Fogler, 2008; Levenspiel, 1999).

Una desviación estándar elevada sugiere una mayor variabilidad en los tiempos de residencia, lo que puede estar asociado a flujos no ideales, mientras que un valor bajo indica tiempos de residencia más concentrados alrededor del promedio, reflejando un flujo más uniforme (Fogler, 2008; Levenspiel, 1999). En investigaciones como la de Alasino et al. (2015), este parámetro se emplea para ajustar modelos hidrodinámicos de reactores flujo pistón (RFP) en paralelo con dispersión, permitiendo caracterizar las condiciones reales del flujo en sistemas complejos, alejados del comportamiento ideal.

Figura 8. Desviación estándar del tiempo medio de residencia.



La Figura 8 muestra la distribución de la concentración del trazador (mg/L) en función del tiempo (s), destacando los intervalos de confianza ($\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$) y los puntos experimentales. La mayor parte de los datos se encuentra dentro del intervalo $\pm\sigma$ (azul), lo que indica una alta densidad de datos alrededor del núcleo central de la distribución, reflejando la consistencia de las mediciones en esta región. El tiempo medio de residencia, representado por la franja anaranjada, no coincide con el pico de mayor concentración, lo que evidencia la presencia de una asimetría en la distribución. Esta asimetría, caracterizada por una cola alargada hacia la derecha, sugiere la existencia de eventos retardados que desplazan el tiempo medio hacia valores mayores. Los valores fuera de $\pm 3\sigma$ (gris) son considerados extremos, posiblemente atribuibles a anomalías experimentales o ruido en las mediciones. En general, la distribución presenta un comportamiento moderadamente asimétrico, lo que indica una variabilidad inherente al sistema que debe ser considerada al interpretar los resultados y al modelar el comportamiento del reactor.

3.4 Efecto de la turbulencia y de la difusividad en el cálculo de los tiempos medios de residencia.

La turbulencia y la difusividad influyen directamente en la dispersión y transporte de partículas dentro de sistemas de flujo. La turbulencia introduce fluctuaciones caóticas que promueven una mezcla intensa, redistribuyendo la energía cinética y facilitando el transporte advectivo en el medio. Este comportamiento genera una mayor dispersión en los tiempos de residencia y puede dar lugar a fenómenos como recirculaciones y zonas de estancamiento, que alteran el flujo ideal y afectan la uniformidad del transporte (Andrade, 2021; Incropera et al., 2013).

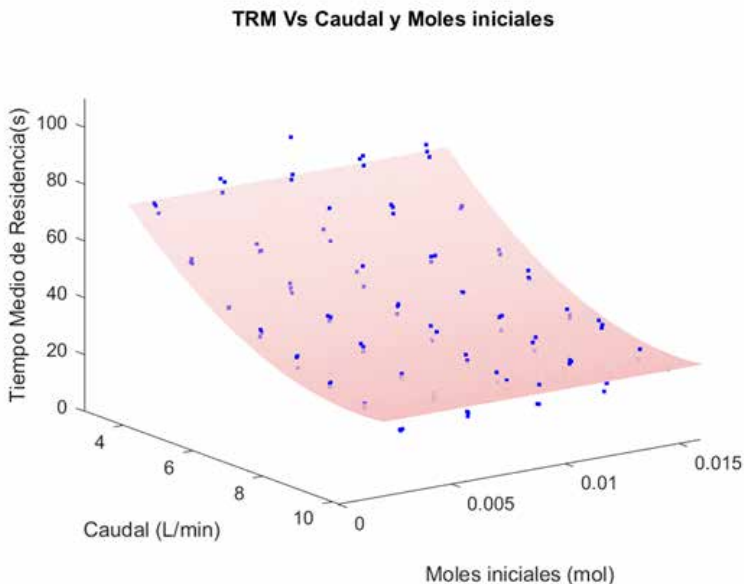
Por otro lado, la difusividad regula el transporte de partículas al suavizar gradientes de concentración, lo que favorece una mayor homogeneidad espacial. Este proceso complementa la acción de la turbulencia, siendo particularmente importante en áreas donde la advección es limitada. Su influencia se manifiesta en la redistribución de los trazadores dentro del sistema, afectando la forma y extensión de la curva de distribución de tiempos de residencia (Andrade, 2021).

La interacción entre turbulencia y difusividad resalta la complejidad inherente de los sistemas de flujo real, donde ambos fenómenos contribuyen a la heterogeneidad de los tiempos de residencia. Ignorar estos factores en el análisis podría llevar a una subestimación de la complejidad hidrodinámica y de las desviaciones observadas respecto al comportamiento ideal.

3.5 Superficie y malla experimental

Como fue mencionado anteriormente, los tiempos medios de residencia dependen, según la ecuación [1], del caudal de entrada al reactor y de los moles en el trazador (Fogler, 2008; Levenspiel, 1999). En consecuencia, para una primera fase de experimentación, se varió el caudal de 3 L/min a 10 L/min manteniendo la concentración del trazador constante; y después se utilizó un rango de concentraciones de 0.05 M a 0.25 M mientras ahora el caudal permanecía fijo. De esta manera, se estableció una malla experimental.

Figura 9. *Tiempos de residencia en función del caudal y de los moles iniciales inyectados.*



En la Figura 9, se visualiza que la tendencia general de la superficie es decreciente con respecto al caudal y lineal con relación al número de moles. Se ajustaron los datos en MATLAB con una ecuación polinómica de grado 2-1, cuya ecuación es:

$$trm (s) = 117,4 - 19,51 \cdot v_o + 161,1 \cdot N_o + 1,006 \cdot v_o^2 + 4,074 \cdot v_o \cdot N_o \quad [4]$$

Donde v_o es el caudal en (L/min) y N_o el número de moles inyectados (mol).

3.6 Efecto del caudal sobre el tiempo de residencia.

Como consecuencia a la tendencia observada en la superficie, se graficaron los tiempos medios de residencia en función del caudal manteniendo los moles del trazador constantes. La tendencia de las curvas de la Figura 10 y 11, es decreciente. Con MATLAB, se aplicó un ajuste racional donde el numerador es un polinomio de grado cero, constante; y el denominador un polinomio de grado uno.

Figura 10. *Tiempos medios de residencia en función del caudal manteniendo $N_o = 3 \text{ mmol}$ constante.*

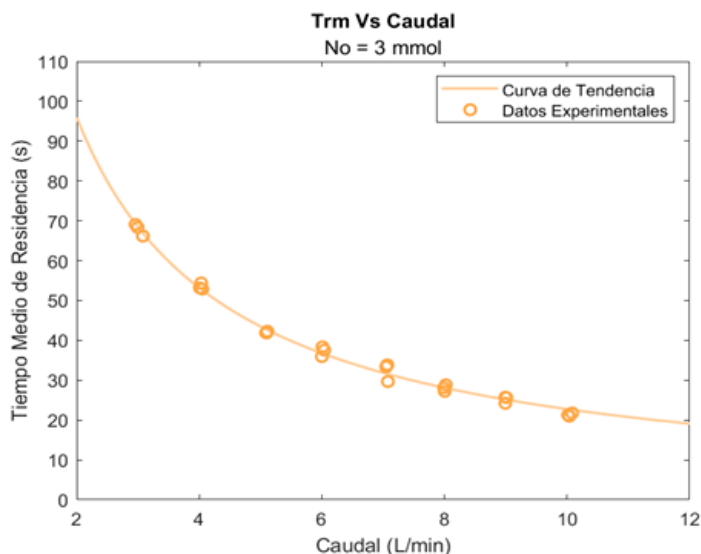
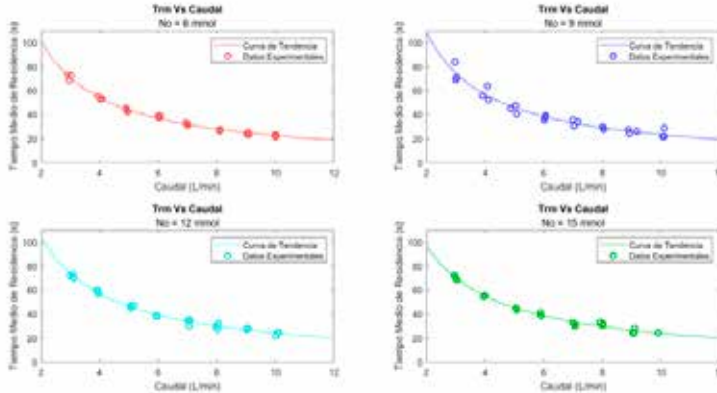


Figura 11. *Tiempos medios de residencia en función del caudal manteniendo No constante para cada gráfica.*

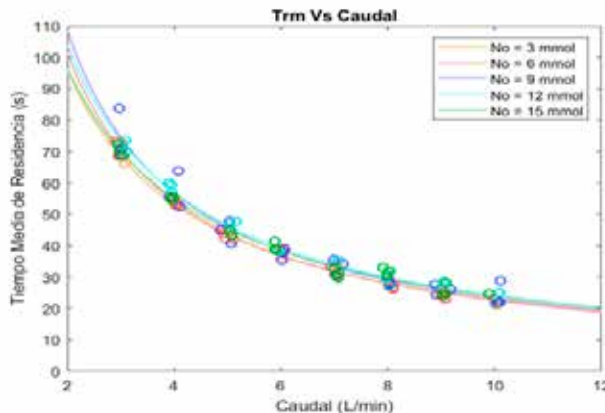


Las gráficas representadas en la Figura 11 corroboran el comportamiento observado durante la experimentación, en el cual, a mayor caudal, el tiempo del cloruro de sodio en el reactor es menor. Al graficar y superponer las curvas, como se observa en la Figura 12, se destaca un comportamiento similar en todas, las desviaciones observadas se deben a errores experimentales. La ecuación para todas las funciones es de la forma:

$$y = \frac{p1}{x + q1} \quad [5]$$

donde, en este caso, 'y' representa el tiempo medio de residencia, 'x' el caudal, y p1 y p2 son constantes.

Figura 12. *Tiempos medios de residencia en función del caudal manteniendo No constante.*



3.7 Efecto de los moles del trazador sobre el tiempo de residencia

A su vez, al mantener el caudal constante y graficar los tiempos de residencia medios en función de los moles inyectados, se observa una tendencia constante tanto en la Figura 13 como en la 14. Esto significa que los tiempos de residencia son independientes de los moles inyectados para el rango de trabajo.

Figura 13. *Tiempos medios de residencia en función de los moles iniciales introducidos al reactor manteniendo el caudal constante en el rango de 3 L/min a 6 L/min.*

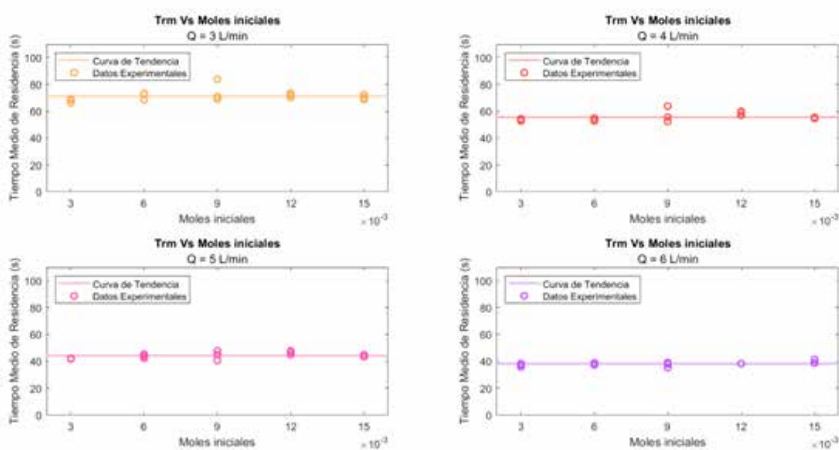
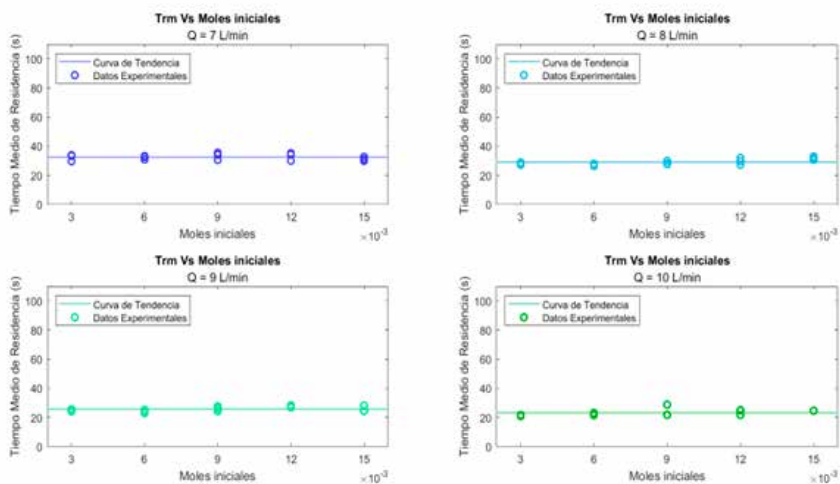
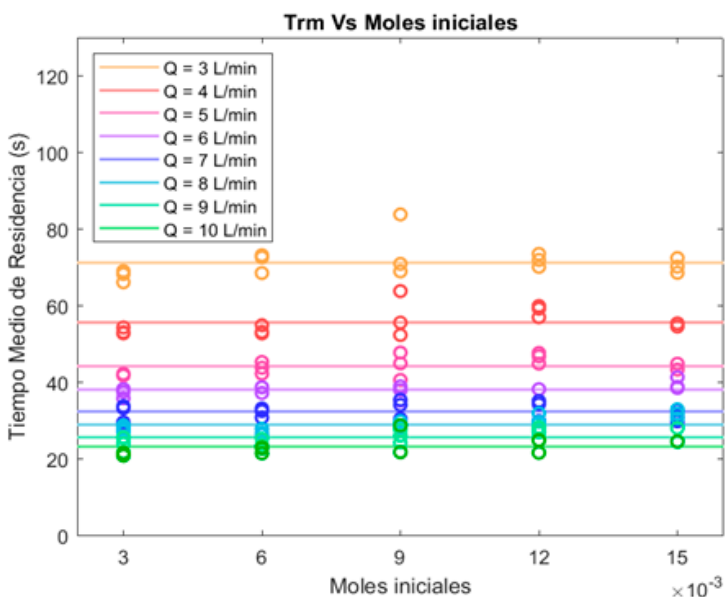


Figura 14. *Tiempos medios de residencia en función de los moles iniciales introducidos al reactor manteniendo el caudal constante en el rango de 7 L/min a 10 L/min.*



En un reactor ideal, el tiempo espacial es igual al tiempo medio de residencia, y este se define como el volumen del reactor entre el flujo volumétrico de entrada. El tiempo espacial es un valor teórico, y no depende de los moles de entrada (Fogler, 2008; Levenspiel, 1999). Entonces, a pesar de que la distribución de tiempo medio de residencia $E(t)$ depende de los moles inyectados, y a priori, los moles parecieran ser una variable que afecta el tiempo medio de residencia, se puede afirmar que, en el intervalo de trabajo, el número de moles no influye en el valor del tiempo medio, esto se corrobora con la Figura 15.

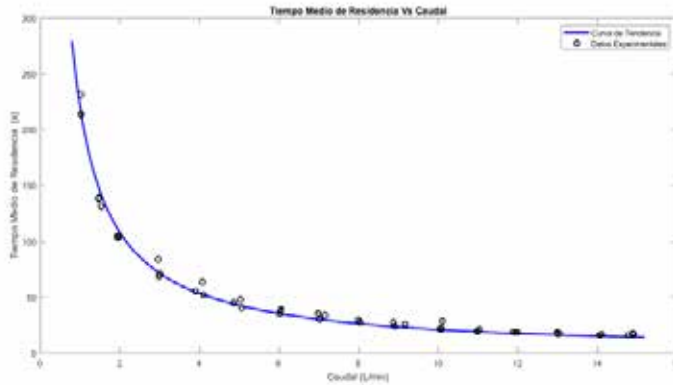
Figura 15. *Tiempos medios de residencia en función de los moles iniciales introducidos al reactor a caudal constante.*



3.8 Curva de los tiempos medios de residencia en función del caudal

Anteriormente, se descartó el efecto de la variación de los moles sobre de los tiempos medios de residencia. Teniendo en cuenta este factor, se realizó una segunda fase de experimentación ampliando los caudales al rango 1 L/min a 15 L/min, inyectando 60 mL de solución salina a concentración a 0,15 M.

Figura 16. *Tiempos medios de residencia en función del caudal manteniendo No, constante.*



En la Figura 16, se presenta la curva que se utilizará para realizar las simulaciones en la aplicación de MATLAB. Esta curva tiene un ajuste racional 0-1, donde el numerador es una constante y el denominador es un polinomio de grado uno. El ajuste del tiempo medio de residencia obtenido fue:

$$T_{rm}(Q) = \frac{221,5 \text{ L}\cdot\text{s}/\text{min}}{Q - 0,047 \text{ L}/\text{min}} \quad [5]$$

donde Q es el caudal en litros por minuto. El numerador tiene una constante (221,5) cuyas unidades son litro por segundo entre minuto; mientras que la constante del denominador (0,047) tiene unidades de litro por minuto. La estructura de la Ecuación [5], tiene gran similitud con respecto a la ecuación de tiempo espacial de:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad [6]$$

donde V es el volumen del reactor que es equivalente de $3,32 \pm 0,02$ litros (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999, Nauman, 2008). De tal manera que, para el caso del reactor construido, el tiempo espacial en función del caudal estaría definida por la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{3,32 \text{ L}}{Q \left(\frac{\text{L}}{\text{min}}\right)} (\text{min}) \quad [7]$$

Si se transforma el numerador del ajuste a unidades de litros:

$$Trm(Q) = \frac{V_{eff} \cdot 60 \text{ s/min}}{Q - Q_0} \quad [8]$$

Donde:

$V_{eff} = 3,692$ es el volumen efectivo aparente deducido del ajuste

$Q_0 = 0,047 \text{ L/min}$ es un caudal umbral (posiblemente relacionado con pérdidas o error instrumental),

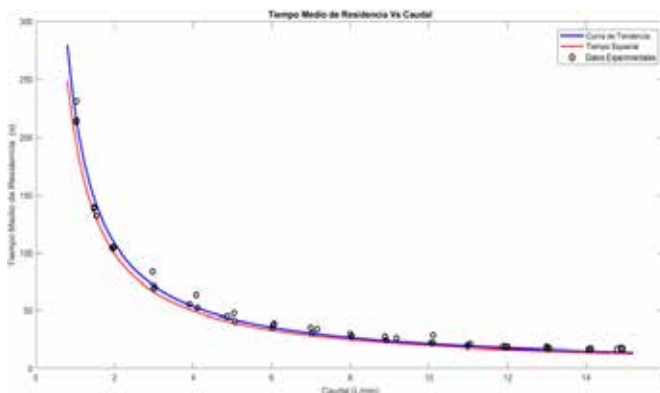
El factor 60 s/min convierte el resultado final a segundos.

$$Trm(Q) = \frac{3,692 \text{ L} \cdot 60 \text{ s/min}}{Q - 0,047 \text{ L/min}} \quad [9]$$

En la Ecuación [9] se observa un factor de conversión de minutos a segundos (60 s/min) y un volumen efectivo del reactor obtenido a partir del ajuste empírico de la curva experimental, $V_{off} = 3,692 \text{ L}$. Este valor es ligeramente superior al volumen geométrico real del reactor ($V = 3,32 \text{ L}$), lo que da lugar a tiempos medios de residencia experimentales mayores que el tiempo espacial teórico ($\tau = V/Q$).

Esta discrepancia es coherente con el comportamiento típico de reactores reales y sugiere la presencia de zonas de estancamiento o cortocircuito parcial, fenómenos comunes en sistemas no ideales. No obstante, como se evidencia en la Figura 17, dicha diferencia resulta insignificante a caudales elevados ($> 2 \text{ L/min}$), donde el reactor exhibe un comportamiento cercano al de flujo pistón ideal.

Figura 17. *Tiempos medios de residencia en función del caudal manteniendo N_0 constante.*



La desviación entre el tiempo medio de residencia experimental y el tiempo espacial teórico se incrementa notablemente cuando el caudal disminuye por debajo de 2 L/min. Este efecto puede atribuirse, al menos en parte, al mayor error relativo del caudalímetro en rangos bajos de flujo, lo cual introduce incertidumbre en las mediciones. Adicionalmente, a caudales reducidos, factores como la turbulencia residual, la difusividad molecular y la dispersión axial pueden influir más significativamente en el perfil de flujo.

En conjunto, estos hallazgos confirman que el diseño del reactor promueve un perfil de flujo altamente plug-flow (flujo pistón), minimizando la dispersión axial en condiciones operativas típicas (especialmente a caudales superiores a 2 L/min). Esta característica valida el uso del modelo empírico representado por la Ecuación [5] (y su equivalente en términos de volumen, la Ecuación [9]) para simulaciones en MATLAB en el rango de interés práctico.

4. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló una experiencia de laboratorio integral para la caracterización hidrodinámica de un reactor de flujo pistón vertical no ideal, combinando experimentación física, sensores de bajo costo (caudalímetro y conductímetro), adquisición automática de datos mediante Arduino y una aplicación interactiva diseñada en MATLAB App Designer. Esta propuesta no solo permite medir en tiempo real el tiempo medio de residencia mediante el método de trazador por pulso, sino que también constituye una herramienta pedagógica innovadora para la enseñanza de la ingeniería química en entornos universitarios.

Los resultados experimentales confirman que, dentro del rango estudiado (1–15 L/min y concentraciones de NaCl entre 0,05 M y 0,25 M), el tiempo medio de residencia depende exclusivamente del caudal volumétrico, siendo independiente de la cantidad de trazador inyectado. Este hallazgo refuerza la validez del modelo teórico del tiempo espacial ($\tau = V/Q$) y demuestra la robustez del método experimental implementado. Además, se obtuvo un modelo empírico racional que describe con precisión la relación inversa entre caudal y tiempo de residencia, facilitando estimaciones rápidas sin necesidad de repetir ensayos.

Más allá de su aporte técnico, esta experiencia fortalece competencias clave en los estudiantes: diseño experimental, manejo de instrumentación, procesamiento de señales, análisis numérico y visualización de datos. Al integrar hardware accesible y software ampliamente utilizado en la industria y la academia, se promueve un aprendizaje activo, contextualizado y alineado con los desafíos actuales de la formación ingenieril. En este sentido, el trabajo responde a las demandas de modernización de los laboratorios docentes y contribuye a una

educación en ingeniería más dinámica, inclusiva y conectada con la práctica profesional y los principios de sostenibilidad en la educación superior (UNESCO, 2017; Luján et al., 2024).

5. Recomendaciones

Con base en los hallazgos de este estudio, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas tanto al desarrollo técnico del reactor como a su potencial uso en entornos educativos:

- Explorar configuraciones alternativas del reactor (por ejemplo, horizontal o empacado) para comparar la distribución de tiempos de residencia, tal como se ha hecho en estudios previos de reactores tubulares no verticales (Li et al., 2015), y enriquecer la experiencia de laboratorio. Estas variaciones permitirían a los estudiantes analizar cómo la geometría y el empaque afectan el comportamiento hidrodinámico, fortaleciendo su comprensión de los conceptos de idealidad y no idealidad en reactores.
- Integrar datos cinéticos reales con la distribución de tiempos de residencia obtenida, para la predicción de conversión del reactor, siguiendo metodologías establecidas en la literatura (Ramachandran & Chaudhury, 2012; Chappra, 2017). Este paso constituiría una extensión natural del trabajo actual y ofrecería un proyecto avanzado para cursos superiores de reactores, donde se articulen hidrodinámica, cinética y diseño de procesos.
- Incorporar esta experiencia en el currículo de laboratorios de ingeniería química, como módulo práctico en asignaturas como Reactores Químicos o Operaciones Unitarias. La combinación de sensores de bajo costo, Arduino y MATLAB App Designer ofrece un modelo replicable, escalable y altamente motivador para los estudiantes, al vincular teoría, experimentación y programación.
- Desarrollar versiones mejoradas de la interfaz en MATLAB, con funcionalidades adicionales como ajuste automático de modelos de dispersión axial, simulación de múltiples reactores en serie o paralelo, o integración con plataformas de aprendizaje virtual (como Moodle o Google Classroom), facilitando su uso en modalidades híbridas o remotas.
- Fomentar proyectos estudiantiles derivados, tales como la evaluación del impacto del error instrumental en la estimación del tiempo medio de residencia, la comparación

de distintos trazadores (colorantes vs. electrolitos), o la implementación de control automático del caudal mediante retroalimentación en tiempo real. Estas actividades promueven el pensamiento crítico, la autonomía y la innovación desde etapas tempranas de la formación.

6. Bibliografía

- Alam, A. U., Clyne, D., Jin, H., Hu, N.-X., & Deen, M. J. (2020). Fully integrated, simple, and low-cost electrochemical sensor array for in situ water quality monitoring. *ACS Sensors*, 5(2), 412–422. <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b02095>
- Alasino, N., Nadal, F., Primo, L., Bollo, P., & Larrosa, N. (2015). Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(3), 93–104. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353541047007>
- Andrade Rosero, V. (2021). Estudio de la hidrodinámica y eliminación de coliformes fecales en la laguna de maduración de la depuradora de aguas residuales de la ciudad de Portoviejo, Ecuador, mediante modelos CFD con OpenFOAM [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de València]. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/177649>
- Añazco Villarreal, L. A. (2015). Diseño del prototipo de un sistema de adquisición de datos para el monitoreo y control de experimentos químicos, mediante el uso de sensores y microcontroladores [Tesis de pregrado, Universidad de las Américas]. <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/4734>
- Aura Camarena, F. (2019). Diseño de un sistema de control para reactores químicos utilizando técnicas de aprendizaje automático [Trabajo fin de grado, Universitat Politècnica de València]. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/142644>
- Balza, J., Guarino, J. P., Inciarte, G. R., Lima, A. G., Quintero, M. C., Lara, G. V., Angarita, E. I., Croquer, A. A., & Colmenares, J. A. (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>
- Campos Mera, G., & Benarroch Benarroch, A. (2024). Laboratorios virtuales para la enseñanza de las ciencias: una revisión sistemática. *Enseñanza de las Ciencias*, 42(2), 109–129. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.6040>
- Chapra, S. C. (2017). *Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists* (4.ª ed.). McGraw-Hill.
- Danckwerts, P. V. (1953). Continuous flow systems: Distribution of residence times. *Chemical Engineering Science*, 2(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(53\)80001-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(53)80001-1)

- Dey, D., Herzog, A., & Srinivasan, V. (2007). Tracer studies in a plug flow reactor (Technical Report). Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University.
- European Commission. (2020). Green paper on digital education: Resetting education and training for the digital age. https://ec.europa.eu/education/sites/default/files/document-library-docs/2020-digital-education-green-paper_en.pdf
- Fogler, H. S. (2016). Elements of chemical reaction engineering (5.^a ed.). Pearson.
- Grinias, J. P., Whitfield, J. T., Guetschow, E. D., & Kennedy, R. T. (2016). An open-source, low-cost potentiostat for undergraduate laboratory experiments. *Journal of Chemical Education*, 93(7), 1316–1319. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00262>
- Hanratty, P. J., & Duduković, M. P. (1992). Detection of flow maldistribution in trickle-bed reactors via tracers. *Chemical Engineering Science*, 47(12), 3003–3014. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(92\)87002-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(92)87002-8)
- Happel, J., Walter, E., & Lecourtier, Y. (1990). Modeling transient tracer studies in plug-flow reactors. *Journal of Catalysis*, 123(1), 12–20. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(90\)90153-B](https://doi.org/10.1016/0021-9517(90)90153-B)
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor (4.^a ed.). Pearson Educación.
- Levenspiel, O. (1999). Chemical reaction engineering (3.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Luján Facundo, M. J., del Río-Rodríguez, J. L., Ferrer Polonio, E., Rodríguez López, A. D., Escrivà Cerdán, C., & Zuriaga Agustí, E. (2024). Integración del ODS 6 y 12 en la asignatura Experimentación en Ingeniería Química II del Grado en Ingeniería Química. En X Congreso de Innovación Educativa y Docencia en Red (pp. 1–12). Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/INRED2024.2024.18483>
- MathWorks. (2024). MATLAB R2024a. The MathWorks, Inc.
- Mikkola, J.-P., Salmi, T. O., & Wärnå, J. P. (2019). Chemical reaction engineering and reactor technology (2.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315200118>
- Nauman, E. B. (2008). Chemical reactor design, optimization, and scaleup. Wiley.
- Nechita, M.-T., Suditu, G. D., Puițel, A. C., & Drăgoi, E. N. (2023). Residence time distribution: Literature survey, functions, mathematical modeling, and case study—Diagnosis for a photochemical reactor. *Processes*, 11(12), 3420. <https://doi.org/10.3390/pr11123420>
- Prabowo, N., Paristiowati, M., & Irwanto, I. (2024). Arduino-based real-time data acquisition systems: Boosting STEM career interest. *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)*, 13(6), 2316–2325. <https://doi.org/10.11591/ijere.v13i6.24024>
- Prince, M. (2004). Does active learning work? A review of the research. *Journal of Engineering Education*, 93(3), 223–231. <https://doi.org/10.1002/j.21689830.2004.tb00809.x>

- PunDIR, A. V. D. E. S. H. S. I. N. G. H. (2020). RTD modeling of a non-ideal coiled-tube reactor through experimental investigation for pulse input using methylene blue dye. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 8(3), 1231–1238. [https://doi.org/10.47277/JETT/8\(3\)1231](https://doi.org/10.47277/JETT/8(3)1231)
- Ramachandran, R., & Chaudhury, A. (2012). *Computational methods for process simulation and optimization using MATLAB*. Wiley.
- Rodrigues, A. E. (2021). Residence time distribution (RTD) revisited. *Chemical Engineering Science*, 230, 116188. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116188>
- UNESCO. (2017). Education for sustainable development goals: Learning objectives. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247444>
- Visco, G., Dell'Aglio, E., Tomassetti, M., Fontanella, L. U., & Sammartino, M. P. (2023). An open-source, low-cost apparatus for conductivity measurements based on Arduino and coupled to a handmade cell. *Analytica*, 4(2), 217–230. <https://doi.org/10.3390/analytica4020017>
- Westerterp, K. R., van Swaaij, W. P. M., & Beenackers, A. A. C. M. (1984). *Chemical reactor design and operation* (2.^a ed.). Wiley.

