



Universidad **Mariana**

Diseño de una Herramienta de Enseñanza/Aprendizaje para el Curso de Modelación Ambiental
de la Universidad Mariana de Pasto (Nariño, Colombia)

Pinzón Figueredo Jeimy Patricia

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
San Juan de Pasto
2024

Diseño de una Herramienta de Enseñanza/Aprendizaje para el Curso de Modelación Ambiental
de la Universidad Mariana de Pasto (Nariño, Colombia)

Pinzón Figueredo Jeimy Patricia

Trabajo de investigación presentado para optar el título de Ingeniera Ambiental

Ph.D. Francisco Javier Caicedo Messa

Asesor

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
San Juan de Pasto
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidas en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Dedicatoria

A Dios, por brindarme la fortaleza y el conocimiento necesario para culminar esta etapa de mi vida.

A mi abuelito, quien me enseñó a observar la naturaleza con amor, admiración y respetarla, sus anécdotas e historias fueron un gran pilar de mi pasión.

A mi padre, quien partió al cielo desde que tengo 5 años, ha sido mi guía en cada paso que doy y el angelito que siempre ha estado cuidando de mí.

A mis hermanos, tíos y sobrinos, por su constante ánimo y por creer en mí en cada paso de este camino.

A mi madre y abuela, por su sacrificio y amor incondicional. Su ejemplo de integridad y esfuerzo ha sido mi guía constante. Gracias por creer en mí y por su apoyo inquebrantable en cada etapa de mi vida.

A mi chiquito bello, por compartir este viaje conmigo. Sus palabras de aliento y sus gestos de apoyo y amor fueron una fuente constante de motivación.

A mis profesores y asesores, por su dedicación y por desafiarme a superar mis propios límites. Por compartir su conocimiento y por guiarme con paciencia y dedicación.

Con gratitud y afecto,

Jeimy Pinzón Figueredo

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios, por bendecirme en cada paso que di durante toda la carrera y enfrentar con valor cada reto.

Agradezco a mi familia por su incondicionalidad, amor y esfuerzo, por estar presentes en mi vida en cada momento, todo lo que soy es gracias a ustedes.

A mi papá y abuelo, que desde el cielo son mis guías y siento que me acompañan en cada paso, este logro es para ustedes y de ustedes.

Finalmente, mi gratitud está con todas las personas que me brindaron su apoyo académico y personal, gracias por este tiempo recorrido y lo que falta en el futuro.

Contenido

1. Resumen del proyecto.....	12
1.1. Problema de investigación.....	12
1.1.1. Descripción de la situación actual y formulación del problema.....	12
1.1.2. Pregunta de investigación.....	13
1.2. Justificación.....	13
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivo general.....	14
1.3.2. Objetivos específicos.....	14
1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos.....	15
1.4.1. Marco contextual.....	15
1.4.2. Marco teórico.....	16
1.4.2.1. Modelos de flujo.....	18
1.4.3. Estado del arte.....	19
1.5. Metodología.....	20
1.5.1. Campo, línea y área de investigación.....	20
1.5.2. Tipo y enfoque investigativo.....	21
1.5.3. Diseño metodológico de la investigación.....	21
1.5.3.1. Fase 1. Conceptos generales y fundamentos teóricos para reactores ideales.....	21
1.5.3.2. Fase 2. Implementar los sistemas ideales a escala piloto.....	23
1.5.3.3. Fase 3. Validar funcionamiento de los sistemas mediante análisis de DTR.....	25
1.5.4. Población y muestra.....	26
1.5.5. Hipótesis.....	27
1.6. Aspectos administrativos.....	27
1.6.1. Presupuesto general del proyecto.....	27
1.6.2. Cronograma general del proyecto.....	27
2. Presentación, análisis y discusión de resultados.....	28

2.1. Objetivo 1. Definir conceptos generales y fundamentos teóricos para reactores ideales.....	28
2.1.1. Tipos de reactores.....	28
2.1.1.1. 1) Reactores de flujo continuo y mezcla completa (RMC).....	29
2.1.1.2. 2) Reactores de tipo flujo pistón (RFP).....	29
2.1.1.3. 3) Reactores de flujo continuo y mezcla completa en serie (CSTR).....	29
2.1.2. Análisis hidrodinámico.....	30
2.1.3. Distribución de tiempos de residencia (DTR).....	32
2.2. Objetivo 2. Implementar los sistemas ideales a escala piloto.....	35
2.2.1. Diseño, construcción y validación de los reactores.....	35
2.2.1.1. 1) Reactor flujo pistón (RFP).....	35
2.2.1.2. 2) Reactor mezcla completa (RMC).....	38
2.2.1.3. 3) Reactor mezcla completa en serie de 4 jarras (RMCS-4).....	41
2.3. Objetivo 3. Validar el funcionamiento con modelación matemática y análisis DTR.....	44
2.3.1. Análisis de resultados del reactor flujo pistón (RFP).....	50
2.3.2. Análisis de resultados del reactor mezcla completa (RMC).....	53
2.3.3. Análisis de resultados del reactor mezcla completa en serie (RMCS-4).....	57
2.3.4. Análisis comparativo entre reactores.....	60
2.3.4.1. Tiempo de retención hidráulico (TRH).....	61
2.3.4.2. Concentración inicial del trazador y volumen inicial del trazador suministrado.....	62
2.3.4.3. Concentración máxima registrada.....	62
2.3.4.4. Tiempo con concentración máxima y tiempo cuando la concentración tiende a cero.....	62
2.3.4.5. Agitación.....	62
2.3.4.6. Porcentaje de zonas muertas.....	64
3. Conclusiones.....	67
4. Recomendaciones.....	68
Referencias bibliográficas.....	69
Anexos.....	73

Índice de Tablas

Tabla 1. Cálculo de la absorbancia a partir de la concentración del trazador.....	45
Tabla 2. Condiciones hidráulicas de cada reactor.....	47
Tabla 3. Registro de los datos de absorbancia y concentración medidos en laboratorio.....	49
Tabla 4. Análisis comparativo - Dinámica de depuración en reactores RMC, RMCS-4 y RFP....	61

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del corregimiento Mapachico en el municipio de Pasto.....	15
Figura 2. Flujo de información en la construcción de modelos y su verificación.....	17
Figura 3. Procedimiento para llegar a la curva $E(t)$	32
Figura 4. Reactor flujo pistón (RFP).....	36
Figura 5. Montaje del reactor flujo pistón (RFP).....	36
Figura 6. Reactor completamente mezclado (RMC).....	38
Figura 7. Montaje del reactor mezcla completa (RMC).....	39
Figura 8. Reactor completamente mezclado en serie (RMCS-4).....	42
Figura 9. Montaje del reactor mezcla completa en serie 4 (RMCS-4).....	43
Figura 10. Diluciones con achiote.....	44
Figura 11. Curva de calibración Concentración vs. Absorbancia.....	46
Figura 12. Muestras de laboratorio RFP.....	50
Figura 13. Perfil temporal de la concentración del trazador en el RFP.....	51
Figura 14. Muestras de laboratorio RMC.....	54
Figura 15. Perfil temporal de la concentración del trazador en el RMC.....	55
Figura 16. Muestras de laboratorio RMCS-4.....	57
Figura 17. Perfil temporal de la concentración del trazador en el RMCS-4.....	58

Índice de Anexos

Anexo A. Marco lógico.....	74
Anexo B. Presupuesto general.....	75
Anexo C. Cronograma de la investigación.....	78
Anexo D. Resultados de DTR y TRH real en los tres tipos de reactores.....	79
Anexo E. Corte Laser - Despiece.....	81
Anexo F. Guía técnica para la evaluación hidrodinámica de reactores.....	82

Glosario

Absorbancia: medida de la cantidad de luz absorbida por una solución o una longitud de onda específica, utilizada para determinar la concentración de un soluto.

Acople rápido: conector que permite unir y desconectar rápidamente tubos y mangueras en sistemas hidráulicos.

Balance de masa: establece que la masa dentro de un sistema cerrado permanece constante, es decir, la masa que entra es igual a la masa que sale más la acumulada.

Caudal: Volumen de fluido que pasa por una sección transversal en unidad de tiempo medida en metros cúbicos sobre segundo (m^3/s) o litros por segundo (L/s).

Distribución de tiempos de residencia (DTR): curva que describe el tiempo de las partículas de un fluido que permanecen en un reactor.

Espectrofotómetro: instrumento utilizado para medir la absorbancia de una solución, para así, determinar la concentración de un soluto.

Estrategias de enseñanza aprendizaje: son técnicas y procedimientos que utilizan los docentes para facilitar el aprendizaje de los estudiantes, promoviendo la comprensión de los contenidos y su participación activa en el proceso educativo

Hidrodinámica de reactores: estudia la dinámica de los fluidos definidos por un campo vectorial de velocidades correspondientes a las partículas del fluido.

Trazador ambiental: es un trazador natural o artificial que se añade a un sistema en estudio con el fin de evaluar o resolver problemas relacionados con operaciones y procesos energéticos, industriales, hídricos y ambientales.

1. Resumen del proyecto

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Descripción de la situación actual y formulación del problema

En la Universidad Mariana, actualmente, las estrategias de enseñanza aprendizaje que se llevan a cabo dentro de las aulas de clase son magistrales, ya que, durante el desarrollo de las clases, la transmisión y adquisición de los conocimientos transmitidos por los docentes facilitan procesos de participación activa, reflexión, análisis de propia práctica y aplicación de conceptos en talleres, parciales y demás evaluaciones que facilitan la validación y confrontación de la práctica con los fundamentos teóricos.

Así mismo, “el estudio de las estrategias de enseñanza docente remite necesariamente a la búsqueda de una clave significativa para comprender los grandes modos de transmisión que se hacen a través de la escuela y la universidad” (Furlán, como se citó en Chinche, 2022, p. 15). De tal modo que la transmisión del conocimiento se caracteriza por tener una serie de dispositivos, que en conjunto forman un gran mecanismo característico de cada época histórica.

Dentro de la facultad de Ingeniería y demás programas, se utilizan modelos matemáticos con el fin de controlar procesos, evaluar diseños y predecir el comportamiento de diferentes temas ambientales, es por esto, que dentro de la formación de un ingeniero es relevante estudiar bioprocesos ambientales mediante modelos matemáticos con ayuda de las estrategias de enseñanza/aprendizaje debido a nivel de complejidad que manejan estas asignaturas.

Por último, la importancia de estas técnicas y estrategias es directamente proporcional a lo útiles que son para la enseñanza de cada alumno, las herramientas de aprendizaje son esenciales al igual que dominar determinados conceptos, utilizar procesos y procedimientos de trabajo adecuados, disponer de determinadas capacidades, habilidades y contar con determinadas actitudes ligadas al proceso de enseñanza/aprendizaje.

1.1.2. Pregunta de investigación

¿Es factible el planteamiento de una guía para la evaluación hidrodinámica de reactores como herramienta de enseñanza aprendizaje para el curso de modelación ambiental de la Universidad Mariana?

1.2. Justificación

Actualmente, el ejercicio docente de la mayoría de las instituciones educativas se caracteriza por desarrollar estrategias de enseñanza expositiva (clase magistral) y enseñanza tradicional, teniendo en algunas ocasiones como consecuencia procedimientos repetitivos de transmisión de conocimientos, limitando procesos como la investigación, la creatividad y la solución de problemas. Así pues, con el fin de lograr un aprendizaje activo y participativo se hace uso de estrategias de enseñanza/aprendizaje (Nolasco, 2006; Parra, 2003).

De esta manera, es conveniente utilizar dichas estrategias, tomando en cuenta las temáticas específicas que se pretende contribuir a desarrollar, en este caso, las competencias pertenecientes a los procesos de hidrodinámica de reactores que, comúnmente, se representan a través de modelos matemáticos que describen su comportamiento, sin embargo, teniendo en cuenta su régimen de flujo, los sistemas pueden ser escalados a nivel de planta piloto e industrial especificando su funcionamiento mediante guías y metodologías propias para sí (Echeverri y Reyes, 2016; Pérez y Torres, 2008).

Por todo lo dicho, se ha establecido como estrategia de enseñanza aprendizaje desarrollar una guía técnica para la evaluación hidrodinámica de reactores en la Universidad Mariana de Pasto, en la cual se especificará el funcionamiento de 3 sistemas ideales (Reactor completamente mezclado, completamente mezclado en serie (3) y flujo pistón). De igual manera, se implementarán los sistemas mencionados a escala piloto, ya que una planta piloto constituye una unidad a pequeña escala que contempla los pasos más importantes de un proceso que requiere investigación experimental imprescindible para el diseño, interpretación o selección de una futura unidad industrial. También, por su parte, son el medio para la aplicación de nuevos enfoques en

un campo y generar experiencias concretas de funcionamiento de lo que representa con el fin de fortalecer y afirmar las conjeturas teóricas (Díaz, 1996; Emanuelli et al., 2013).

Análogamente, es pertinente aclarar que la modelación matemática simula hechos o fenómenos del mundo real a través de expresiones matemáticas e interacciones de procesos físicos, químicos y biológicos, cuyo fin es comprender ampliamente dichos fenómenos para lograr una predicción matemática en determinado tiempo (Bojaca et al., 2017). En el campo de la ingeniería y áreas afines, se pueden implementar dichos modelos con el fin de controlar procesos, evaluar diseños y predecir el comportamiento de diferentes temas ambientales (Snape et al., 1997).

En este orden de ideas, se hace énfasis en la importancia que tienen los diferentes procesos para representar el comportamiento hidrodinámico de reactores, es decir, la aplicación de la parte teórica y la parte experimental, son procesos análogos, los cuales se pueden contrastar entre sí para obtener un resultado más acertado, aplicando los modelos a escala de laboratorio y compararlos con los teóricos, ya que se introducen conceptos de modelación y sus aplicaciones se ilustran mediante el uso de ejemplos de casos simplificados.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar una guía técnica para la evaluación hidrodinámica de reactores como herramienta de enseñanza aprendizaje para el curso de modelación ambiental de la Universidad Mariana.

1.3.2. Objetivos específicos

- Definir conceptos generales y fundamentos teóricos para reactores ideales.
- Implementar los sistemas ideales a escala piloto.
- Validar el funcionamiento de los sistemas implementados a través de la modelación matemática mediante el análisis de distribución de tiempos de residencia.

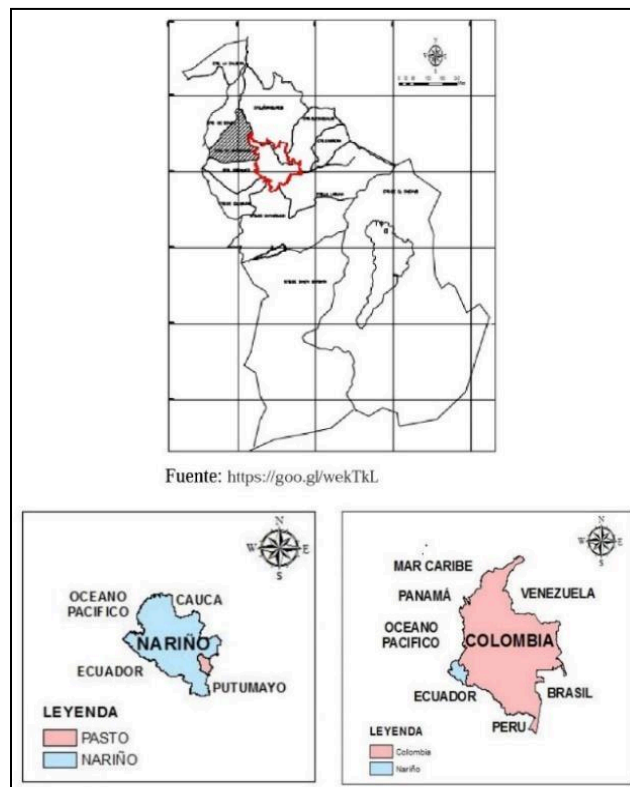
1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos

1.4.1. Marco contextual

El presente trabajo de investigación se desarrolló dentro de los laboratorios de la Universidad Mariana, en la sede del campus deportivo Alvernia, ubicado en el corregimiento de Mapachico a 7 kilómetros al occidente de la ciudad de San Juan de Pasto, localizado astronómicamente a $1^{\circ} 15'$ y $1^{\circ} 20'$ Latitud Norte, $77^{\circ} 15'$ y $77^{\circ} 20'$ Longitud Oeste, limitando al norte con el corregimiento de Morasurco, al sur con Corregimiento de Obonuco, al oriente con el perímetro urbano de Pasto y por último al occidente con el municipio de la Florida (ver Figura 1), la densidad poblacional según los registros DANE 2004 son de 1.244 habitantes (Caicedo, 2013).

Figura 1

Ubicación del corregimiento Mapachico en el municipio de Pasto



Fuente: Revista Escala, 2021.

1.4.2. Marco teórico

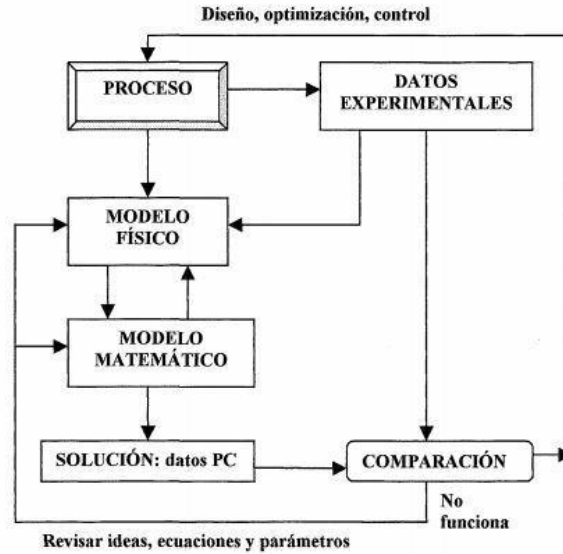
Los procesos ambientales consisten en interacciones complejas entre procesos físicos, químicos y biológicos. El más importante de estos se puede expresar en términos de ingeniería utilizando las técnicas científicas y de ingeniería de balances de masa y energía, cinética microbiana y de población, termodinámica, procesos de transporte, reacciones químicas y bioquímicas, transferencia de masa y calor y estequiometría a través de la modelación (Snape et al., 1997).

Así pues, para evaluar los complejos procesos ambientales, de transporte y transformación de contaminantes en el ambiente o para encontrar alguna solución a los problemas de contaminación y tomar decisiones basadas en esas soluciones se tienen tres herramientas: (1) la observación directa, la cual permite identificar la extensión de los problemas ambientales, (2) Experimentos a escala de laboratorio y ensayos con prototipos que simulen algún elemento real, los cuales permiten comprender los fenómenos físicos, químicos o biológicos, detrás de los problemas identificados (Modelación Física) por ejemplo, apelan a los modelos físicos para poder tener una maqueta en miniatura de sistemas, reactores, máquinas u obras que les permita perfeccionar su labor en la realidad y (3) la modelación y simulación matemática que, a través del lenguaje de las matemáticas, describe el comportamiento de sistemas, aparatos, fenómenos u objetos (Aral, 2010).

Una de las características más importantes del modelado es la necesidad frecuente de reevaluar tanto la teoría básica como las ecuaciones matemáticas para lograr un resultado realista. Para esto se deben tener en cuenta diferentes etapas como se muestra en la Figura 2, la primera implica la definición adecuada del problema, después, la teoría disponible debe formularse en términos matemáticos, una vez desarrollado el modelo las ecuaciones deben ser resueltas y posteriormente verificar la predicción y si es necesario el modelo (Snape et al., 1997).

Figura 2

Flujo de información en la construcción de modelos y su verificación



Fuente: Snape et al., 1997.

Ahora bien, para conceptualizar un modelo de un proceso ambiental generalmente se comienza con el balance de una cantidad que se conserva: masa o energía, este balance se puede escribir de la siguiente manera:

Ecuación 1.

$$\begin{array}{l}
 \textit{Flujo de} \\
 \textit{masa/energía} \\
 \textit{de entrada al} \\
 \textit{proceso}
 \end{array}
 -
 \begin{array}{l}
 \textit{Flujo de} \\
 \textit{masa/energía} \\
 \textit{de salida del} \\
 \textit{proceso}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \textit{Tasa de} \\
 \textit{acumulación de} \\
 \textit{masa/energía en el} \\
 \textit{proceso}
 \end{array}$$

Fuente: Smith y Corripio, 1991.

Una vez desarrollada formulación de ecuaciones de balance de masa y energía apropiadas, a estas se pueden agregar relaciones adicionales que representan: tasas de reacción química, tasas

de transferencia de calor y masa, cambios en las propiedades del sistema, equilibrio de fases y control (Snape et al., 1997).

Por otra parte, para determinar correctamente un balance de materia/energía se debe tener en cuenta los tipos de flujo de fluidos.

- **Flujo permanente, continuo o estable:** se caracteriza porque las condiciones de velocidad del fluido y sus propiedades termodinámicas (por ejemplo: presión, temperatura y densidad) en cualquier punto no cambian con el tiempo, es decir, que permanecen constantes con el tiempo, o bien, si las variaciones en ellas son tan pequeñas con respecto a los valores medios.

- **Flujo intermitente, discontinuo o no estable:** las propiedades de un fluido y las características mecánicas del mismo serán diferentes de un punto a otro dentro de su campo, además si las características en un punto determinado varían de un instante a otro se dice que es un flujo no permanente (Bequette, 2013).

1.4.2.1. Modelos de flujo. 1) Reactor con flujo intermitente, discontinuo o no estable: este tipo de flujo solo se maneja en reactor de tipo Batch, donde el sistema es cerrado y los materiales que se adicionan al tanque se mezclan perfectamente en un tiempo determinando, la composición de la mezcla dentro del reactor es uniforme en cualquier instante, lo que quiere decir que la operación se produce en estado no estacionario (Manzano & Aguagallo, 2011).

Así mismo, la operación de este reactor consiste en llenar la unidad y dejar el líquido un determinado tiempo según sea el caso de estudio, este puede realizarse con mezcla o sin ella, una vez termine el proceso se puede vaciar la unidad y repetir el ciclo.

2) Reactor con flujo continuo o estable: en este tipo de flujo los reactores pueden ser: (a) flujo pistón, (b) mezclado y (c) no ideal.

a) Flujo de pistón: se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella al mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a

través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad.

b) Flujo mezclado: un reactor con flujo mezclado es aquel en el que todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente dentro de él. Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida de la unidad es igual a la existente en todo el reactor.

c) Flujo no ideal: este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo a pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación.

1.4.3. Estado del arte

A nivel internacional, se cuenta con la investigación titulada: *Mathematical Modeling: From Classroom To The Real World*, elaborada en 2016 por Lombardo Ferreira Denise y Jacobini Otavio en Sao Paulo, Brasil, donde aborda los modelos matemáticos como metodología de enseñanza aprendizaje para el desarrollo de problemas cotidianos de los estudiantes, especialmente cuando tales situaciones están relacionadas con sus actividades profesionales actuales o futuras (Brown & Ikeda, 2015).

Así mismo, la investigación titulada: *Different Perspectives In Research On The Teaching And Learning Mathematical Modelling* elaborada por el autor Blomhoj Morten en Roskilde University, Dinamarca, donde hace énfasis en que, durante las últimas décadas, la introducción del modelado matemático y las aplicaciones en casos de estudio es probablemente, junto con la introducción de la tecnología de la información, la más importante. Ya que enfatiza que el modelado matemático como un elemento importante en un currículo secundario matemático actualizado que se prepara generalmente para una educación superior (Brown & Ikeda, 2015).

A nivel nacional, se cuenta con la investigación titulada: *La modelación matemática como estrategia de enseñanza-aprendizaje: el caso del área bajo la curva desarrollada en Bogotá*, en 2016, donde usan la modelación matemática como una herramienta didáctica para la enseñanza y

aprendizaje de ciencias básicas en la formación de ingenieros (Peña y Morales, 2016).

Otra investigación titulada: Modelación Matemática en Ingeniería en el 2016 en Tuluá, Valle del Cauca, Colombia, donde a través de la recopilación de diferentes trabajos de modelación matemática realizó una revisión bibliográfica sobre los resultados que diversas investigaciones que se han obtenido sobre el tema, rescatando aquellas propuestas que han replanteado la concepción de la enseñanza de la matemática y las estrategias en las que se debería explorar para lograr, entre los alumnos, una formación profesional integral, reflexiva y capaz de resolver problemas en el ejercicio de la ingeniería (Plaza, 2016).

Por último, a nivel nacional la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible brinda diferentes herramientas para la gestión integral del recurso hídrico, las cuales se pueden utilizar para entender los procesos hidrodinámicos de reactores en Colombia, incluido el Departamento de Nariño. Así como, estudios locales en cuerpos de agua como el río Pasto y las cuencas cercanas han comenzado a incorporar la modelación para determinar la calidad del agua, lo que proporciona un marco útil para abordar problemas similares en sistemas de tratamiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

1.5. Metodología

1.5.1. Campo, línea y área de investigación

El campo y línea de la presente investigación es ambiental, puesto que se hará un estudio de la hidrodinámica de reactores con el fin de diseñar una estrategia de enseñanza aprendizaje para el curso de modelación ambiental.

El área de investigación es de Control de Contaminación porque al implementar los tres sistemas ideales a escala piloto se brinda a los alumnos del curso de modelación matemática una herramienta didáctica para visualizar y estudiar la dispersión de ciertos contaminantes, según sea el caso de estudio.

1.5.2. Tipo y enfoque investigativo

El tipo de investigación es a nivel evaluativo, ya que busca definir, identificar, obtener y propiciar información útil sobre la hidrodinámica de reactores ideales con el fin de crear una herramienta de enseñanza/aprendizaje para el curso de modelación ambiental. Teniendo en cuenta la descripción de los objetivos, el enfoque de la presente investigación es cualitativa e investigativa porque se recopiló información primaria y secundaria en inglés y español del comportamiento hidrodinámico de sistemas ideales y flujo mixto respecto a la modelación ambiental para la creación de una herramienta de enseñanza/aprendizaje para el curso de modelación ambiental.

1.5.3. Diseño metodológico de la investigación

Para dar inicio al desarrollo de una guía técnica para la evaluación hidrodinámica de reactores como una herramienta de enseñanza/aprendizaje para el curso de modelación ambiental de la Universidad Mariana, se plantearon tres objetivos específicos que se ejecutaron ordenada y sistemáticamente a través de distintas actividades relacionadas en el marco lógico del Anexo A.

La metodología planteada cuenta con tres fases, cada fase corresponde a un objetivo específico de la investigación, donde se describe detalladamente el paso a paso de las actividades programadas en el marco lógico para lograr el objetivo general. Así las cosas, el presente trabajo se desarrolló de la siguiente manera:

1.5.3.1. Fase 1. Conceptos generales y fundamentos teóricos para reactores ideales.

Inicialmente, se realizó una búsqueda y selección de información secundaria sobre la literatura científica encontrada en las diferentes bases de datos. Para ello, se hizo un análisis de cada documento que pudiera contener conocimientos relevantes y verídicos para definir adecuadamente los fundamentos teóricos y conceptos generales de los reactores ideales. En este sentido, los repositorios de información más destacados fueron los siguientes:

- ❖ Google Scholar;
- ❖ World Wide Science (WorldWideScience.org);

- ❖ ScienceDirect (www.sciencedirect.com);
- ❖ Scielo (www.scielo.org.co);
- ❖ BASE (Bielefeld Academic Search Engine), entre otros.

Cabe resaltar, que estas plataformas fueron contempladas para este trabajo de grado porque, tal como lo mencionan Jurado y Mercado (2017), son de fácil acceso y contienen investigaciones a nivel internacional, nacional y local, donde se puede encontrar gran variedad de información literaria confiable.

Tras realizar este primer filtro hubo selección de la documentación y se clasificó los tipos de fluidos que existen, según su movimiento y simulando sistemas naturales y contruidos, así como también a indicar la categorización de reactores de acuerdo con el flujo a tratar.

De acuerdo con esto, se indicó y explicó los 3 modelos de reactores más empleados en el campo de la ingeniería ambiental, con el propósito de simular posteriormente los fenómenos de transporte y destino de contaminantes o sistemas para el control de la contaminación. Dichos modelos se clasificaron de la siguiente manera:

- ❖ Reactores Flujo Pistón (RFP)
- ❖ Reactores de Flujo Continuo y Mezcla Completa (RMC)
- ❖ Reactores de Flujo Continuo y Mezcla Completa en Serie (RMCS)

Cabe decir, que al definir los tipos de reactores también se hizo un ajuste en el tercer modelo (RMCS), donde se trabajó con un sistema de reactores de mezcla completa en serie de 4 recipientes (RMCS-4), esto con el propósito de obtener y analizar la mayor cantidad de información posible, de tal manera, que la evaluación de dicho procedimiento pueda efectuarse con datos más precisos.

De igual manera, también se abordaron conceptos relacionados con el análisis hidrodinámico para explicar el comportamiento real de los reactores respecto al control de la contaminación ambiental. Además, se describieron las ecuaciones pertinentes sugeridas por la literatura,

indicando el método de cálculo para determinar el tiempo de residencia o retención (TRT), la curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) y el tiempo medio de residencia real (t_m).

1.5.3.2. Fase 2. Implementar los sistemas ideales a escala piloto. Una vez se seleccionaron los tres modelos de los reactores a trabajar (RFP, RMC, RMCS-4), se generó los planos a escala piloto, donde las medidas correspondientes para cada sistema fueron adaptadas teniendo en cuenta estos criterios: A) las dimensiones del equipo agitador de jarras dispuesto en el laboratorio de Alvernia; B) El documento guía sobre el comportamiento hidráulico de reactores realizado por Marín et al. (2010); C) las directrices y concertaciones realizadas por el docente asesor en las distintas asesorías. CONSENSO

En este sentido, los planos realizados de RFP, RMC y RMCS-4 se pueden observar en las figuras 4, 6 y 8 respectivamente, se empleó la aplicación de AUTOCAD especializada en diseño, para indicar sus características físicas tales como: dimensiones (alto, ancho, profundo), estructura, la cota del fluido y demás, particularidades de los elementos internos. Además, para la construcción de los reactores se consideraron los siguientes elementos:

- ❖ Lámina de acrílico transparente de 3 mm (1,20 m x 1,80 m)
- ❖ Cloruro de metileno
- ❖ Conectores rápidos rectos de 8 mm (accesorios de acople rápido)
- ❖ Manguera
- ❖ Abrazaderas
- ❖ Cinta aislante
- ❖ Lija
- ❖ Franela o trapo
- ❖ Jeringa de 5 ml

Para dar inicio a la construcción de los sistemas, se realizó un despiece a cada reactor teniendo en cuenta las dimensiones acotadas anteriormente y posteriormente se llevó la lámina de acrílico a un corte laser, dicho archivo se encuentra en el Anexo E, lo que permitió una geometría ideal para el montaje de cada sistema.

Consecutivamente, empleando una lija se prosiguió a suavizar todos los bordes de cada lámina de acrílico, de este modo, se aseguró que la adhesión y acoplamiento de cada tablilla fuera ideal

para realizar la unión de los lados de cada reactor. El elemento fijador fue el cloruro de metileno, al ser un compuesto con propiedades específicas para la adhesión del acrílico, el cual fue aplicado cuidadosamente con una jeringa de 5 ml.

Del mismo modo, para la instalación de los conectores de acople rápidos rectos de 8 mm, se hizo un corte circular con láser en las láminas de acrílico correspondientes, dependiendo del tipo de reactor.

Así las cosas, para el RMC se realizó un corte circular en dos láminas de acrílico opuestas, de tal manera, que el conector de entrada se posiciona en la parte baja de la primera lámina de acrílico y el conector de salida se situará en la parte alta de la segunda lámina paralela como se puede apreciar próximamente en la Figura 7.

Para el RMCS-4, también se hizo un corte circular sólo en las dos láminas paralelas de cada recipiente con el propósito de unir los 4 reactores en serie, por tanto, se instalaron 5 acoples en dos posiciones distintas (inferior y superior) de forma intercalada entre jarra y jarra (Marín et al., 2010).

En este sentido, el primer conector (entrada del flujo) se colocaría en la parte inferior de la jarra #1 y el segundo conector estaría en la parte superior de la lámina opuesta de la misma jarra, por tanto, este conector se uniría con la primera lámina de la jarra #2, la cual a su vez tendría un tercer conector en la parte baja de su lámina opuesta, uniéndose así a la jarra #3, sistemáticamente hasta llegar a la jarra #4, dónde se ubicaría el quinto conector (salida del flujo) en la zona inferior de su segunda lámina de acrílico como se muestra en la Figura 9.

En el caso del RFP, se emplearon dos conectores que se ubican en un solo extremo del sistema, es decir, que la entrada y salida del flujo se instalaron en la parte inferior y superior, respectivamente, de la misma lámina de acrílico, como se muestra más adelante en la Figura 5.

Una vez instalados los accesorios de acople rápido, se corrigieron utilizando una cinta aislante para evitar las pérdidas de agua. Luego, con el apoyo de las abrazaderas se ensamblaron las

mangueras a los conectores de entrada y salida de cada reactor. Finalmente, tras realizar el anterior procedimiento, se obtuvieron las siguientes unidades:

- a) **RMC:** un contenedor en acrílico cuadrado.
- b) **RMCS-4:** cuatro contenedores rectangulares en acrílico.
- c) **RFP:** un sistema flujo pistón, con tres láminas de acrílico internas paralelas e intercaladas.

1.5.3.3. Fase 3. Validar funcionamiento de los sistemas mediante análisis de DTR. Una vez culminada la fase de construcción de los reactores, se realizó una serie de ensayos con el propósito de llevar a cabo pruebas detalladas en cada uno de los sistemas, de modo que, al realizar las primeras pruebas para verificar el correcto funcionamiento de los sistemas, el fluido circule sin ninguna fuga.

En primera instancia, se hizo la preparación de la solución madre, utilizando achiote como agente trazador para llevar a cabo las pruebas experimentales. Para ello, se emplearon los siguientes elementos:

- ❖ 1 Cronómetro
- ❖ 20 Gramos de achiote en polvo
- ❖ 1 Soporte universal de laboratorio
- ❖ 6 Balones volumétricos de 100 ml
- ❖ 1 Balón volumétrico de 1000 ml
- ❖ 1 Beaker de 1000 ml
- ❖ 1 Varilla de vidrio
- ❖ 1 Embudo de vidrio
- ❖ 1 Probeta graduada
- ❖ Papel Filtro

El proceso de preparación del trazador se llevó a cabo con precisión, dónde se pesaron 20 gramos de achiote y fueron diluidos a través de papel filtro con la ayuda de un soporte universal, una probeta y un embudo. Seguidamente, se aforó el balón volumétrico con agua hasta alcanzar la marca de 1 litro, generando así la solución madre con una concentración específica de 20.000 mg/l de achiote.

Posteriormente, se llevó a cabo la medición de seis (6) diluciones escalonadas en balones de vidrio de 100 ml donde se aplicaron concentraciones 5,10,20,30,40 y 50 ml del trazador en cada uno, luego haciendo uso del espectrofotómetro se obtuvo la absorbancia de cada muestra con el fin de determinar la longitud de onda y el área bajo la curva que, posteriormente, se empleó para calcular la concentración en los reactores.

La aplicación de la curva de calibración ($y = mx \pm b$) permite la determinación de la concentración del trazador mediante el despeje de la variable x , en la Ecuación 8, posteriormente, se utilizaron fórmulas matemáticas específicas para la determinación de parámetros clave y parámetros teóricos como son el caudal, volumen de trazador, tiempo de residencia teórico, entre otros.

A continuación, mediante la ecuación 4 se calculó el volumen del trazador necesario para cada reactor. Y con la Ecuación 2, se obtuvo el tiempo de retención teórico.

Es así cómo, se inició cada ensayo agregando el volumen del trazador calculado para cada reactor en la entrada de cada uno. Se tomaron muestras de 5 ml en beakers y con la ayuda del cronómetro se realizaron muestreos cuidadosos de los efluentes durante los dos primeros minutos cada 30 segundos, seguidos de intervalos de 1 minuto hasta alcanzar los 10 minutos. Posteriormente, se redujo la frecuencia a intervalos de 5 minutos hasta alcanzar un periodo total equivalente a tres veces el tiempo de retención teórico determinado para cada reactor.

En la etapa final de este diseño metodológico, se sintetizaron y condensaron todos los resultados de la investigación en el documento guía, constituyendo un informe detallado que refleja el riguroso proceso experimental.

1.5.4. Población y muestra

La población abordada en esta investigación abarca todos los posibles escenarios y sistemas donde los conceptos de los reactores ideales, específicamente RFP, RCM y RCMS-4, encuentran aplicaciones en el ámbito de la ingeniería ambiental en el estudio con simulaciones de procesos

de transporte y destino de contaminantes.

La muestra seleccionada para este estudio consiste en los sistemas piloto implementados a escala, representando los Reactores Flujo Pistón, Reactor Completamente Mezclado, y Reactor Completamente Mezclado en Serie.

1.5.5. Hipótesis

La guía técnica para la evaluación hidrodinámica de reactores diseñada permite aplicar los conceptos de modelación ambiental como herramienta de enseñanza aprendizaje para el curso de modelación ambiental de la Universidad Mariana.

1.6. Aspectos administrativos

1.6.1. Presupuesto general del proyecto

El presupuesto global de la investigación fue de \$2.543.200 pesos, este costo total fue asumido por la investigadora, ver Anexo B.

1.6.2. Cronograma general del proyecto

Con el fin de lograr una correcta ejecución del objetivo general del proyecto se plantearon actividades por cada objetivo específico y se estimaron fechas para su ejecución. Ver anexo C.

2. Presentación, análisis y discusión de resultados

En este capítulo se describe y analizan los resultados obtenidos sistemáticamente en el desarrollo de los tres objetivos específicos planteados así:

2.1. Objetivo 1. Definir conceptos generales y fundamentos teóricos para reactores ideales

Dentro del curso de modelación matemática se habla de la hidrodinámica de reactores, la cual estudia el comportamiento del movimiento de los fluidos, principalmente los incomprensibles, es decir, los líquidos en movimiento que carecen de viscosidad y su flujo puede ser estacionario o estable (Hernández, 2014).

Es así, que, a través del estudio de la hidrodinámica de reactores y la amplia gama de problemas ambientales, estos pueden ser modelados matemáticamente mediante diferentes simulaciones, ya que todos los bioprocesos físicos, químicos y biológicos de tratamiento de aguas y aguas residuales ocurren dentro de un compartimiento comúnmente denominado reactor (Valle, 2010).

Dentro de este mismo contexto, los fluidos se pueden clasificar de acuerdo a su movimiento a través de los sistemas naturales como: ríos, lagos, océanos, etc., y en sistemas construidos como: sistemas de aguas residuales, sistemas de agua potable, etc., clasificándose así en flujos intermitentes o discontinuos y continuos (Fogler, 2006).

También, Sperling (2007), dice que los reactores se pueden clasificar en función del tipo de flujo presente, siendo así: reactor con flujo intermitente o continuo si el proceso que se realiza dentro del reactor es por carga o reactor con flujo ininterrumpido de alimentación y descarga, también existen reactores semicontinuos.

2.1.1. Tipos de reactores

A este respecto, los modelos de reactores más utilizados en ingeniería ambiental y demás, para

modelar y simular diferentes fenómenos de transporte y destino de contaminantes o sistemas para el control de la contaminación, son: (1) los modelos de reactores de Flujo Continuo y Mezcla Completa (RMC), (2) los modelos de reactores de Tipo Flujo Pistón (RFP), y (3) los reactores de Tipo Mezcla Intermedia o de Flujo Arbitrario (MFR).

2.1.1.1. 1) Reactores de flujo continuo y mezcla completa (RMC). Se considera un tanque de líquido con flujos que entran y salen. Si el tanque está bien mezclado, la concentración y la densidad del contenido son uniformes en todo el volumen del tanque. Esto significa que las propiedades de la corriente de salida, como la concentración y la densidad son idénticas a las del contenido del tanque (Nazaroff & Alvarez - Cohen, 2001).

2.1.1.2. 2) Reactores de tipo flujo pistón (RFP). En este tipo de reactores las concentraciones de los productos y los reactivos varían continuamente a lo largo de la longitud del reactor, incluso cuando este está funcionando en estado estable. Para el caso ideal de RFP sin mezcla axial, esta variación puede considerarse como equivalente a la del tiempo de paso del material a medida que fluye a lo largo del reactor y es equivalente al tiempo disponible para que se produzca la reacción. En condiciones de estado estable, la concentración en cualquier posición a lo largo del reactor será constante con respecto al tiempo, aunque no con la posición (Fogler, 2016).

También, al ser un reactor con flujo continuo o estable, se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella al mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad (Levenspiel, 1999).

2.1.1.3. 3) Reactores de flujo continuo y mezcla completa en serie (CSTR): el modelo de flujo en un reactor real se encuentra en un punto intermedio entre las condiciones de mezcla de los reactores RMC y RFP. Las variaciones del comportamiento hidráulico pueden ser evaluadas experimentalmente (Fogler, 2016).

Es así, como uno de los modelos que describe las desviaciones del flujo ideal es el CSTR en

serie y se basa en la hipótesis de que el volumen del reactor puede ser representado por un conjunto de n números de reactores de mezcla completa de igual tamaño conectados en serie (Fogler, 2016).

Por último, en este tipo de reactor con flujo mezclado en serie, todo fluido que ingresa se dispersa inmediatamente dentro de la unidad, donde se cumple que la concentración de una sustancia a la salida del reactor es igual a la existente en todo el volumen del reactor (Fogler, 2016).

2.1.2. Análisis hidrodinámico

En el análisis del comportamiento real de reactores en el ámbito del control de la contaminación ambiental en ingeniería ambiental se realiza en reactores ya construidos, en este análisis se debe conocer como es el patrón del flujo (mezcla completa, flujo pistón o flujo intermedio), para realizar dicho análisis en los reactores se hace a través de un estudio con trazadores mediante el análisis hidrodinámico de los reactores (Fogler, 2006).

En tal sentido, Fogler (2006) menciona que el trazador es una sustancia no reactiva, fácilmente detectable y completamente soluble, su fin es hacer una marca sobre el fluido para ser medible, en este caso se supondrá que los sistemas no llevan a cabo reacciones químicas, es decir, dicha sustancia no se transformará química o biológicamente.

La inyección del trazador puede ser: señal en pulso, es decir, se inyecta una cantidad de trazador a la entrada del reactor una sola vez en el menor tiempo posible, y luego se mide su concentración a la salida; o señal en escalón, donde se comienza a inyectar un flujo molar constante del trazador a la entrada del reactor a partir de un instante $t = 0$ y luego se mide su concentración a la salida sea igual a la de entrada (Fogler, 2006).

Ahora bien, la marca de un trazador permite medir el tiempo de retención o residencia teórico (TRT), es decir, es el tiempo necesario para procesar un volumen de fluido del reactor basado en las condiciones de entrada y su distribución es una característica del mezclado que ocurre dentro

del sistema, es decir, es el tiempo que permanece un volumen de mezcla igual al volumen de fluido dentro del reactor. Es así, que la determinación del TRT se hace partir de la siguiente fórmula:

Ecuación 2.

$$TRT = \frac{V_r}{Q}$$

Contemplando dos variables fundamentales, representadas por el volumen particular del reactor y el tiempo de aforo, el caudal de ingreso se obtendría a partir del siguiente planteamiento:

Ecuación 3.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q : Caudal ingresa al reactor.

V : Volumen del reactor.

t : Tiempo de aforo

Para la determinación del volumen del trazador, se contempló la ley de conservación de masa en el contexto de flujos o procesos donde se involucran líquidos o gases en movimiento, propuesta por Antoine Lavoisier, a partir de la cual se manifiesta que, es un sistema cerrado, la cantidad total de masa será constante con el tiempo, independientemente de los procesos físicos o químicos que ocurrieran en su interior. De este modo, asumiendo que este principio de inalterabilidad de masa es aplicable en las pruebas con reactores, es posible despejar la variable $V/2$ que representa el volumen del trazador a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 4.

$$V_1 C_1 = V_2 C_2$$

Donde:

V_1 : Volumen del reactor (L).

C_1 : Concentración del trazador en el reactor (mg/L).

V_2 : Volumen del trazador (L).

C_2 : Concentración inicial del trazador (mg/L).

2.1.3. Distribución de tiempos de residencia (DTR)

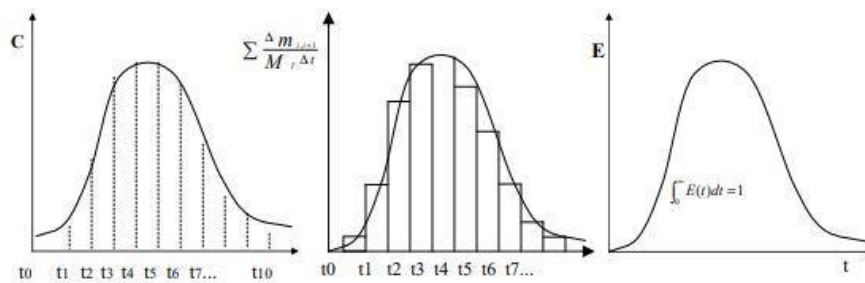
Si se logra determinar el tiempo de residencia de cada porción de la alimentación que entra a un reactor, se puede obtener la curva de DTR que representa la información real sobre el comportamiento hidrodinámico del reactor (Sperling, 2007).

Es así como, la distribución de tiempos de residencia se obtiene a partir de la curva concentración en función del tiempo (C vs. t), la cual permite la determinación del tiempo de retención hidráulico (TRH) o tiempo medio de residencia real (t_m) como se representa en la

Figura 3.

Figura 3

Procedimiento para llegar a la curva $E(t)$



Fuente: Valle, 2010.

Ecuación 5.

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

Donde:

$C(t)$: Concentración en el instante t .

$E(t)$: Distribución de tiempos de residencia.

Ecuación 6.

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} E(t) t dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt}$$

Donde:

$E(t)$: Distribución de tiempos de residencia.

t_m : Tiempo medio de residencia real o tiempo de residencia hidráulico.

Como $\int_0^{\infty} E(t) dt = 1$, el tiempo medio de residencia, se puede calcular como se representa

en la siguiente modelo matemático:

Ecuación 7.

$$t_m = \int_0^{\infty} E(t) t dt$$

El tiempo de residencia medio proporciona información sobre el comportamiento hidráulico de los reactores, al definir los tipos de reactores y sus características, se hace evidente que este parámetro es un indicador de la eficiencia con la que los fluidos permanecen en el reactor y participan en los procesos de mezcla (Fogler, 2016).

Este análisis es crucial, ya que permite evaluar si el flujo dentro del reactor se asemeja a un

comportamiento ideal de mezcla completa o si existen desviaciones hacia patrones de flujo más complejos, como el flujo pistón o mezclas intermedias (Fogler, 2016).

Dado que, en el RMC la concentración y la densidad del contenido son uniformes a lo largo del volumen del reactor, esto indica que el tiempo de residencia medio debe ser calculado considerando una distribución uniforme del tiempo de residencia del fluido, lo que se puede verificar experimentalmente a través del análisis de distribución de tiempos de residencia. Este concepto es especialmente relevante, ya que la curva $E(t)$ describe la distribución del tiempo de residencia para todas las partículas del fluido, lo cual permite evaluar la eficiencia del mezclado dentro del reactor (Fogler, 2016).

Ahora bien, en contraste el RFP muestra un comportamiento más complejo ya que las concentraciones a lo largo del reactor no son homogéneas, es por esto que el tiempo de residencia puede variar dependiendo la posición en la que se encuentre el fluido dentro del reactor y la distribución de tiempos de residencia tiende a ser variable (Fogler, 2016).

Por otro lado, en los reactores CSTR el tiempo medio se evalúa considerando las desviaciones del flujo ideal, lo cual refleja las condiciones reales del funcionamiento del reactor, la integración de este parámetro con la ecuación $E(t)$ y el uso de un trazador permite obtener una medición precisa de la distribución del tiempo de residencia, brindando una herramienta para validar el funcionamiento del sistema y optimizar los procesos dentro del reactor (Fogler, 2016).

Finalmente, el cálculo y análisis del tiempo medio de resistencia (T_m) y la distribución de tiempos de residencia (DT_9), son parámetros esenciales para caracterizar el desempeño de los reactores ideales en términos de eficiencia hidráulica (Fogler, 2016).

2.2. Objetivo 2. Implementar los sistemas ideales a escala piloto

Para la construcción de cada sistema de reactores se elaboraron tres planos guía, en donde se indicaron las dimensiones y demás características físicas de los respectivos modelos, para luego proseguir con el despiece y ensamblaje de los reactores RFP, RMC y RMCS-4 como se muestra más adelante en las figuras 4, 6 y 8.

Cabe resaltar, que para los tres montajes se hizo uso de una bomba peristáltica con el fin de controlar y mantener constante el líquido que entra al sistema y también para RMC y RMCS-4 se usaron equipos de agitación rápida a 50 RPM.

A continuación, se presentan los criterios de diseño de los reactores implementados y el resultado final de su desarrollo:

2.2.1. Diseño, construcción y validación de los reactores

2.2.1.1. Reactor flujo pistón (RFP). En esta investigación, se diseñó un RFP cuyas dimensiones son 16 cm de profundidad, 40 cm de ancho y 5,5 cm de alto. Este reactor se caracteriza por tener tres láminas internas de acrílico, cada una de 36 cm de ancho por 5,5 cm de alto, dispuestas de forma intercalada, con una separación de 4 cm entre ellas. Esta configuración está detalladamente ilustrada en la Figura 4, mostrando el diseño preciso de cada pieza, incluyendo conectores rápidos y mangueras.

El material principal, acrílico de 3 milímetros de espesor, fue seleccionado por su transparencia, facilitando la observación del comportamiento del líquido y el trazador dentro del reactor. La Figura 5 destaca la disposición única de los conectores en un extremo del sistema, ubicados en la parte inferior y superior de la misma lámina de acrílico. Durante la construcción, se utilizó cinta aislante y abrazaderas para asegurar la estabilidad y correcta instalación de los accesorios, adicionalmente en el montaje de este diseño se hizo uso de una bomba peristáltica con el fin de controlar el caudal de entrada al reactor.

Figura 4

Reactor flujo pistón (RFP)

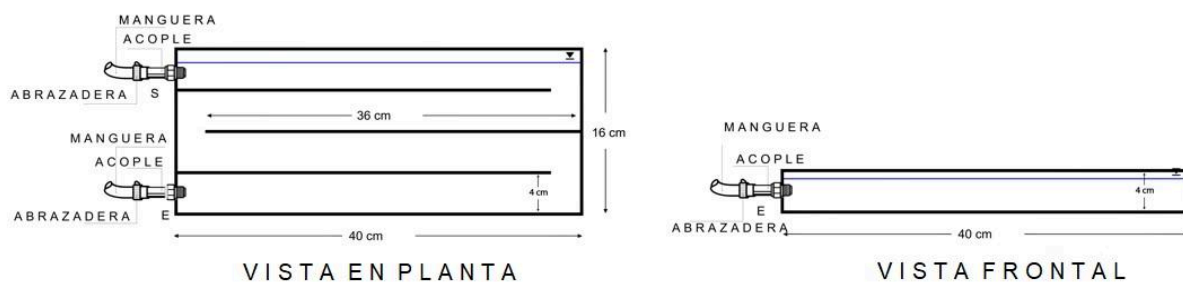


Figura 5

Montaje del reactor flujo pistón (RFP)



Autores como Lainfiesta (2009), describieron el diseño de un RFP helicoidal a escala de laboratorio. Este reactor fue diseñado con un volumen de 1,5 litros, un diámetro interno de 2,54 cm y una longitud total de 6 metros, basándose en la constante de velocidad de reacción del sistema acetato de etilo-hidróxido de sodio a 22 °C.

El reactor fue construido con una base de acrílico y un cuerpo de tubo de PVC, materiales seleccionados por su estabilidad, economía y facilidad de adquisición. Se integraron elementos muestreadores y conectores de plástico, y se calibraron bombas centrífugas para el experimento, variando el voltaje de 3 V a 6 V en intervalos de 0,5 V.

En el estudio de Cano (2010), se investigó la influencia de diferentes trazadores, Rodamina WT y NaCl, en reactores con variadas geometrías y la presencia o ausencia de baffles. Se realizaron tres réplicas por tratamiento en dos unidades experimentales con diferentes relaciones Largo:Ancho (1:2 y 2:1), con y sin baffles, y se mantuvo un caudal constante mediante bombas peristálticas.

Las dimensiones específicas de estas unidades eran: largo de 0,15 m a 0,30 m, ancho de 0,30 m a 0,15 m, área superficial de 0,045 m², y una profundidad total de 0,45 m con una profundidad de la lámina de agua de 0,40 m. Este enfoque permitió un análisis detallado de cómo la geometría y los baffles afectan la dinámica de los fluidos en el reactor.

Finalmente, Rodríguez y Pérez (2021) se enfocaron en el modelado de un reactor de flujo pistón (PFR-01) mediante ecuaciones cinéticas, considerando factores como la temperatura, presión y composición de los productos. Utilizaron un catalizador comercial de níquel soportado en alúmina y diseñaron un reactor tubular con un diámetro interno de 20 mm y una longitud de 254 mm, utilizando SOLIDWORKS para el diseño mecánico. Este enfoque se centró en las propiedades mecánicas y térmicas del material del reactor, seleccionando acero 1045 por su bajo costo y adecuadas propiedades para el estudio.

Al comparar estos estudios, se observan similitudes en el uso de materiales como el acrílico y el PVC, pero diferencias significativas en la configuración, diseño y enfoques experimentales. Mientras que el presente estudio se enfocó en la construcción detallada y la observación del comportamiento del fluido, otros investigadores como Lainfiesta (2009) y Cano (2010) abordaron aspectos como la geometría del reactor y la influencia de los baffles.

Rodríguez y Pérez (2021) se destacaron por su enfoque en el modelado cinético y el diseño mecánico del reactor. Estas variaciones reflejan la amplitud y profundidad del campo de estudio de los RFP, subrayando la importancia de considerar múltiples factores en el diseño y operación de estos sistemas en aplicaciones de ingeniería.

2.2.1.2. Reactor mezcla completa (RMC). La investigación en torno al Reactor Completamente Mezclado (RCM) ha sido extensa y variada, como se evidencia en los hallazgos de este trabajo y los estudios de otros investigadores. En esta discusión, se incorporan todos los datos proporcionados para ofrecer una visión exhaustiva y comparativa de los diferentes enfoques y resultados en el ámbito de los RCM.

En el estudio actual, se implementó un RCM a escala piloto, utilizando un contenedor cuadrado construido en acrílico de 3 mm de espesor ilustrado en la figura 6. En el montaje de este diseño se utilizó un equipo de agitación a 50 RPM y una bomba peristáltica con el fin de controlar el caudal de entrada.

Una característica distintiva de este diseño fue los conectores de acople rápido en la entrada y salida del reactor como se muestra en la Figura 7. Además se tomaron medidas adicionales, como el uso de cinta aislante y abrazaderas, para asegurar la integridad del sistema y evitar pérdidas de agua.

Figura 6

Reactor completamente mezclado (RMC)

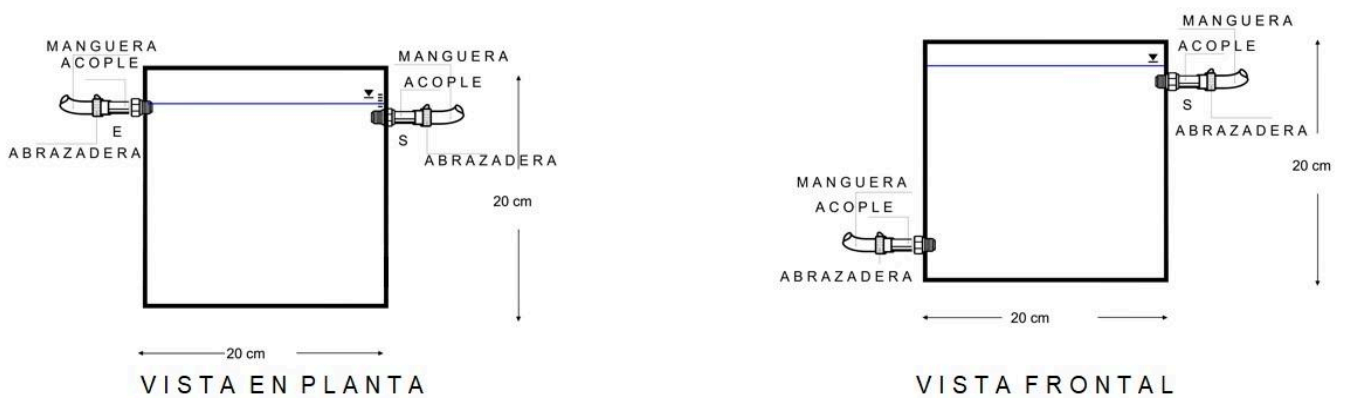


Figura 7

Montaje del reactor mezcla completa (RMC)



Comparando este diseño con el de Eraso y Ruiz (2015), se observan diferencias notables. Estos investigadores diseñaron un RCM experimental a escala de laboratorio para estudiar los coeficientes cinéticos en lodos activados en el tratamiento de aguas residuales. Su reactor tenía un volumen de 120 litros (105 litros efectivos) y estaba equipado con sistemas de aireación y calentamiento. Además, realizaron una calibración exhaustiva que incluyó la medición del volumen del tanque, la temperatura del agua, la velocidad de la motobomba y la cantidad de oxígeno disuelto, utilizando instrumentos específicos como termómetros, tacómetros y oxímetros. Este reactor fue construido con láminas de acrílico transparente de 5 mm de espesor, contaba con difusores para la aireación, una motobomba para recirculación de sólidos, y un termostato para controlar la temperatura.

El estudio realizado por Bayas y Nuñez (2011), ofrece un enfoque distintivo en el diseño y funcionamiento de Reactores Completamente Mezclados (RCM), destacándose por su enfoque en las relaciones adimensionales aplicadas a tanques agitados. En su investigación, se concentraron en un reactor de acero inoxidable 304, un material seleccionado por sus propiedades anticorrosivas, lo que representa una notable divergencia de los diseños más comunes en acrílico. Este reactor se compone de dos tanques de alimentación, cada uno con una capacidad de 3 litros, integrados en un sistema que permite un flujo continuo y controlado de reactivos.

El flujo de estos reactivos se regula mediante rotómetros, lo que garantiza una precisión y consistencia notables en la alimentación del reactor. Además, el diseño incluye un tanque agitado de doble camisa con la misma capacidad de 3 litros, lo cual es crucial para el proceso de mezcla y reacción. La importancia de mantener un control riguroso de la temperatura en sus experimentos se refleja en la inclusión de una niquelina, un elemento calefactor regulado por un termostato. Esta característica es fundamental para asegurar condiciones experimentales estables y reproducibles, permitiendo a estos investigadores realizar estudios consistentes y fiables.

El estudio de Moreno (2011) se centra en un enfoque innovador y detallado hacia el Reactor Completamente Mezclado (RCM), especialmente en términos de su operación en estado estacionario y la selección minuciosa de materiales y diseño. Se enfatiza que su RCM opera bajo condiciones estacionarias, lo que implica que variables como la temperatura, la presión y la composición se mantienen constantes a lo largo del tiempo. Esta característica es fundamental en el estudio de reacciones químicas, ya que permite una mayor predictibilidad y control sobre los procesos que tienen lugar dentro del reactor.

El diseño se destaca por su agitación interna, que garantiza una mezcla homogénea de los reactivos y asegura que todas las partes del fluido en el reactor tengan igual probabilidad de ser expulsadas en cualquier momento. Este enfoque hacia la mezcla homogénea es crucial para la precisión y la repetibilidad de los experimentos. El reactor, con un volumen de 290 ml, es adecuado para trabajos a pequeña escala, permitiendo experimentos de laboratorio eficientes y manejables. Este tamaño compacto facilita la experimentación bajo una variedad de condiciones sin requerir grandes cantidades de reactivos o generando desechos excesivos.

Por otra parte, también se detallan los materiales y elementos utilizados en la construcción del RCM. Entre estos se incluyen abrazaderas de plástico, flujómetros, tubería, válvulas de aguja, bombas sumergibles y conexiones de acero inoxidable, elementos elegidos cuidadosamente para garantizar la fiabilidad y durabilidad del equipo. Además, el estudio presenta diagramas del sistema del reactor, incluyendo una nomenclatura detallada de los equipos auxiliares como tanques de almacenamiento, bombas, válvulas y rotómetros.

La comparación de estos estudios revela una notable diversidad en el diseño y operación de los RCM. Cada uno aborda distintos aspectos, desde la selección de materiales y capacidades hasta métodos de calibración y condiciones operativas. A pesar de estas diferencias, hay un objetivo común en la optimización y eficiencia de los RCM, subrayando su importancia en áreas como la ingeniería de reactores y el tratamiento de aguas residuales.

Por último, el diseño del RMC visualizado en la figura 6 presenta varias ventajas en comparación con Bayas y Nuñez (2011); Eraso y Ruiz (2015) y Moreno (2011), principalmente su transparencia, ya que como se mencionó anteriormente fue construido con acrílico transparente de 3 mm, lo cual permite la observación en tiempo real del comportamiento del fluido y del trazador, facilitando el análisis y monitoreo del flujo en el reactor a diferencia de materiales opacos como el acero inoxidable Bayas y Nuñez (2011).

Además, su tamaño compacto de 20 cm y la adaptación de conectores de acople rápido hacen que este diseño optimice la entrada del flujo y trazador al sistema facilitando demás adaptaciones y ajustes en el montaje, así mismo el espacio que ocupa es ideal para experimentos y demostraciones en entornos educativos controlados donde el acceso a equipos y recursos es limitado, como en la investigación de Eraso y Ruiz, 2015 que requieren más espacio y mayores cantidades de trazador para hacer funcionar el sistema.

Finalmente, esta simplicidad en el diseño minimiza costos y evita el uso de equipos auxiliares, a la vez que lo convierte en una herramienta pedagógica accesible y práctica para la enseñanza de los principios hidrodinámicos de reactores completamente mezclados y facilitando la comprensión de los sistemas a los estudiantes (Eraso y Ruiz, 2015).

2.2.1.3. Reactor mezcla completa en serie de 4 jarras (RMCS-4). La evaluación hidrodinámica de los reactores, específicamente el Reactor Completamente Mezclado en Serie (RCMS), es un área de estudio crucial en el campo de la Ingeniería Ambiental.

En el presente trabajo, se han comparado los resultados obtenidos de un estudio propio con los hallazgos de otros investigadores, como Univalle (2010) y Marín et al. (2010), para brindar una

discusión integral de los resultados.

De esta manera, se diseñó y construyó un RMCS-4, que consta de cuatro contenedores rectangulares interconectados, cada uno con dimensiones de 9,5 cm de ancho, 9,5 cm de profundidad y 16 cm de alto (ver Figura 8). Para este modelo, se utilizaron materiales como lámina de acrílico transparente, cloruro de metileno, conectores rápidos, manguera y otros componentes (ver Figura 9).

Una característica notable fue el corte circular en las láminas paralelas de cada recipiente para unir los reactores en serie, lo que implicó la instalación de acoples de manera intercalada. Así mismo, se resalta el empleo de la bomba peristáltica para la regulación del flujo de agua y el equipo de agitación rápida a 50 RPM para cada contenedor.

Figura 8

Reactor completamente mezclado en serie (RMCS-4)

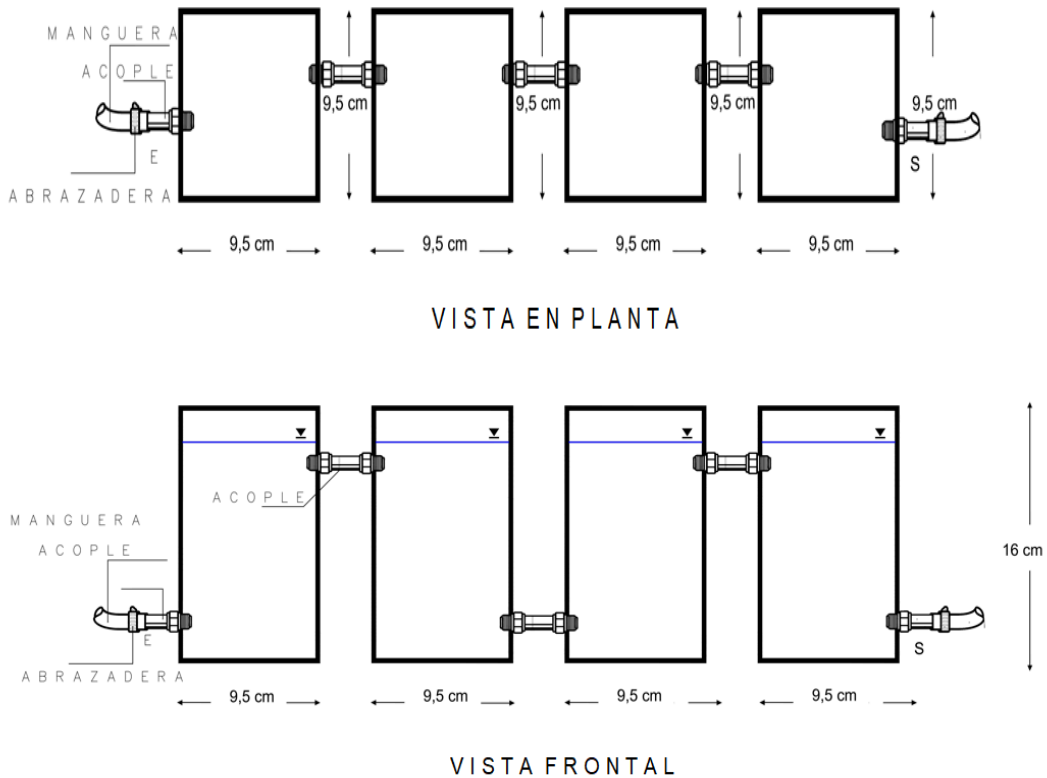


Figura 9

Montaje del reactor mezcla completa en serie 4 (RMCS-4)



Comparativamente, Univalle (2010) reportó el uso de dos prototipos del RMCS, uno de tres jarras (RMCS-3) y otro de seis (RMCS-6). Estos también fueron construidos con acrílico y conectados en serie. La característica distintiva de estos prototipos es la distribución de tiempos de residencia (DTR) exponencial, lo cual indica que la mayoría de los fluidos tienen un tiempo de residencia corto en el reactor, mientras una fracción menor permanece por más tiempo. Esta característica es fundamental para entender el comportamiento hidráulico y la cinética de las reacciones químicas y biológicas que se llevan a cabo dentro de estos sistemas.

Por otro lado, Marín et al. (2010) enfocaron su estudio en la utilización de reactores de acrílico conectados en serie, utilizando tubos de conexión y válvulas, así como bombas peristálticas para controlar el flujo. Ellos emplearon el azul de metileno como trazador para simular el comportamiento de sustancias contaminantes bajo condiciones controladas. Su enfoque se centra en la aplicación práctica y el análisis detallado de los contaminantes en estos sistemas de reactores.

2.3. Objetivo 3. Validar el funcionamiento con modelación matemática y análisis DTR

Esta etapa se inicia con las disoluciones del trazador, donde se pesaron 20 gramos de achiote que posteriormente se disolvieron empleando un papel filtro para obtener un trazador ideal sin ningún residuo. Seguidamente, se aforó un balón de vidrio con agua hasta 1 litro, dando como resultado la solución madre con una concentración de 20.000 mg/l de achiote, tal como se aprecia en la Figura 10.

Figura 10

Diluciones del Trazador



Luego, se realizaron seis (6) diluciones con distintas concentraciones de achiote en seis (6) balones de vidrio de 100 ml con diluyente (agua) hasta la marca correspondiente de cada uno, como se observa en la figura 10.

A continuación, se establece la longitud de onda de absorción del trazador mediante un procedimiento de análisis espectrofotométrico, este análisis se utiliza para calibrar el espectrofotómetro y asegurar que se esté midiendo correctamente la concentración del trazador en la longitud de onda más sensible (Harris, 2015; Skoog, West, Holler & Crouch, 2014).

En primer lugar, se realizó un barrido en blanco con el trazador disuelto en solvente para garantizar que no hubieran interferencias de otras sustancias. Posteriormente, se barrió en el rango de longitudes de onda disponibles para identificar el valor en el que el trazador mostró la máxima absorción, lo que permitió determinar una longitud de onda de 464,0 nanómetros (nm).

Ahora, en la Tabla 1 se registraron las concentraciones de cada disolución y por cada muestra se obtuvo una absorbancia específica, con estas dos variables se generó la curva de calibración.

Tabla 1

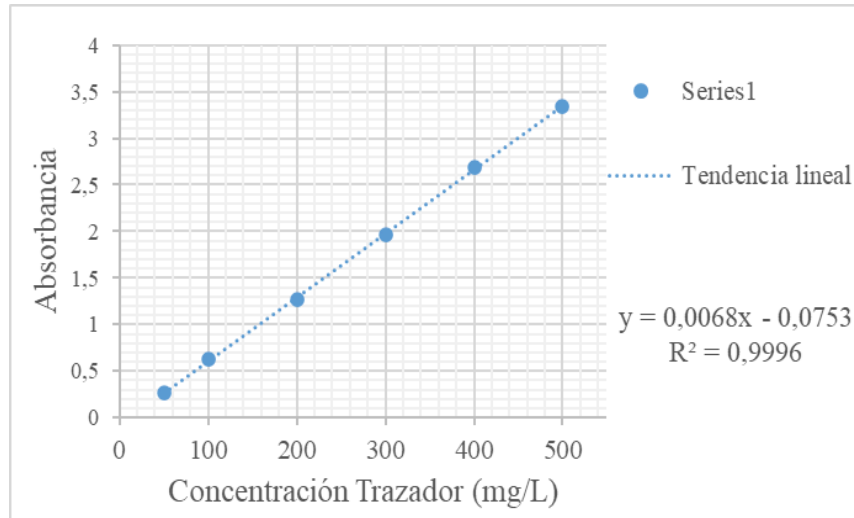
Cálculo de la absorbancia a partir de la concentración del trazador

Muestra	C (mg/L)	Absorbancia
1	50	0,261
2	100	0,631
3	200	1,273
4	300	1,964
5	400	2,684
6	500	3,339

Con las mediciones de la absorbancia de las diluciones realizadas en el laboratorio del Campus Alvernia, se determinó la curva de calibración expresada en la Figura 11, donde se relaciona la variación de la absorbancia respecto al cambio de los niveles de concentración del indicador.

Figura 11

Curva de calibración Concentración vs. Absorbancia



La delimitación de la curva de calibración permitió evaluar la eficacia de los reactores a partir de una función de primer grado expresada como: $Y = 0,0068X - 0,0753$. Con esta expresión se despejó y calculó la concentración del trazador (eje de abscisas “X”) dependiendo de los valores arrojados por la absorbancia (eje de ordenadas “Y”). De este modo, surgió la siguiente ecuación.

Ecuación 8.

$$X = \frac{Y + 0,0753}{0,0068}$$

Donde:

X: Concentración del Trazador (mg/L)

Y: Absorbancia

Por otra parte, considerando la necesidad de definir el TRT de acuerdo con la estructura de la Ecuación 2, se calculó en primera instancia el volumen de cada reactor. De esta forma, para encontrar el volumen de RMC y RMCS-4, se multiplicaron las medidas de sus tres dimensiones físicas: alto (o cota de lámina de agua) , ancho y profundidad.

En el caso del RFP se halló un volumen efectivo, el cual fue resultado de la diferencia entre el volumen del reactor y el volumen de las tres láminas de acrílico. Seguidamente, para hallar el caudal de cada sistema, se calibró un flujo de alimentación constante proporcionado por una bomba peristáltica durante el desarrollo de los ensayos, para un volumen de aforo de 5 ml. Los datos obtenidos se registraron en la siguiente tabla:

Tabla 2

Condiciones hidráulicas de cada reactor

Tipo de Reactor	Volumen Reactor		Caudal		Tiempo de Retención Teórico		Volumen de Trazador Suministrado	
	(ml)	(l)	(ml/s)	(l/s)	(s)	(min)	(ml)	(l)
RFP	3392	3,39	5,65	0,0057	600,35	10,01	67,8	0,068
RMC	7120	7,12	5,186	0,0052	1372,93	22,88	142,4	0,142
RMCS-4	2188,8	2,19	5,61	0,0056	1560,64	26,01	43,8	0,044

Según estas condiciones, se puede decir que el TRT para el RMCS-4 fue de 26 minutos, reflejando el valor más alto de todos. En contraste, para el reactor RMC, se consiguió un TRT aproximado de 22,9 minutos. Mientras tanto, el RFP reveló un periodo de retención más breve de 10 minutos. Esto último puede indicar una dinámica hidráulica distinta, adaptada posiblemente a tratamientos más rápidos o a condiciones de flujo específicas.

Para asegurar que la concentración del trazador en cada reactor fuera la misma, se tomó una concentración de referencia de 400 mg/L que se obtuvo a partir de la muestra 5 de la Tabla 1 de la curva de calibración.

De esta manera, se calcularon tres volúmenes de la solución madre que se extrajeron e introdujeron al inicio de cada prueba de acuerdo con las condiciones particulares de cada reactor según el diseño y volumen.

El volumen deseado del trazador se definió en la Ecuación 4 como V_2 , entonces esta variable se despejó y se calculó bajo las siguientes consideraciones:

1. El volumen de cada reactor (V_1) era particular (los cálculos se disponen en la Tabla 2).
2. La concentración inicial (C_2) de la solución madre era la misma en todos los casos (20.000 mg/L).
3. La concentración total del trazador que se deseaba en cada reactor debía ser la misma (400 mg/L) (C_1).

Este procedimiento aseguró que la inyección del trazador estuviera calculada para simular unas condiciones operativas realistas y precisas según las características físicas y de diseño de cada uno de los reactores.

Los resultados del despeje del volumen del trazador, se registraron meticulosamente (ver Tabla 2) y se efectuaron de la siguiente forma: para el reactor RMC, se agregaron 142,4 ml del trazador; continuamente, para el RMCS-4, se inyectaron 43,8 ml; y en el caso del RFP, se suministró un volumen de 67,8 ml. Estas cantidades fueron esenciales para garantizar la precisión de los experimentos, permitiendo una evaluación efectiva de la dinámica de flujo y la eficiencia del tratamiento en cada reactor.

Al adicionar dichas cantidades del trazador en cada sistema y al entrar en contacto con el líquido, se inició con el cronometraje y se tomaron muestras de 5 ml en cada efluente de los reactores para efectuar el análisis respectivo. Posteriormente, con la ayuda del espectrofotómetro, se calculó la absorbancia en todas las pruebas de los tres reactores, de tal manera, que se obtuviera el mayor número de ejemplares posibles con el propósito de determinar los perfiles temporales de la concentración del trazador desde su inicio, hasta su estabilización.

De este modo, se obtuvo un total de 26 muestras para el RFP, 29 muestras para RMC y 24 para el RMCS-4. Una vez realizadas estas pruebas se registraron los datos de absorbancia y,

empleando la Ecuación 8, se calcularon los valores de concentración del trazador en todos los ensayos de cada reactor. Dichos hallazgos fueron recopilados en la Tabla 3, donde se resaltan los valores más altos correspondientes a los picos de concentración de trazador según su respectivo caso, entonces:

Tabla 3

Registro de los datos de absorbancia y concentración medidos en laboratorio

No. Muestra	Tiempo (Min)	RFP		RMC		RMCS-4	
		Abs	[C]	Abs	[C]	Abs	[C]
1	0,5	0,000	11,01	0,199	40,10	0,005	11,74
2	1	0,010	12,47	0,464	78,84	0,010	12,47
3	1,5	0,020	13,94	0,669	108,80	0,011	12,62
4	2	0,050	18,32	0,776	124,44	0,012	12,77
5	3	0,080	22,71	0,754	121,23	0,017	13,50
6	4	0,081	22,85	0,727	117,28	0,018	13,64
7	5	0,083	23,14	0,720	116,26	0,021	14,08
8	6	0,092	24,46	0,640	104,56	0,029	15,25
9	7	0,143	31,91	0,597	98,28	0,037	16,42
10	8	0,243	46,53	0,570	94,33	0,073	21,68
11	9	0,309	56,18	0,551	91,55	0,105	26,36
12	10	0,407	70,50	0,519	86,88	0,130	30,01
13	15	0,314	56,91	0,395	68,75	0,218	42,88
14	20	0,249	47,41	0,301	55,01	0,212	42,00
15	25	0,240	46,09	0,285	52,67	0,153	33,38
16	30	0,209	41,56	0,202	40,54	0,103	26,07
17	35	0,149	32,79	0,160	34,40	0,054	18,91
18	40	0,120	28,55	0,137	31,04	0,019	13,79
19	45	0,083	23,14	0,124	29,14	0,018	13,64
20	50	0,069	21,10	0,108	26,80	0,014	13,06

No. Muestra	Tiempo (Min)	RFP		RMC		RMCS-4	
		Abs	[C]	Abs	[C]	Abs	[C]
21	55	0,035	16,13	0,097	25,19	0,014	13,06
22	60	0,009	12,33	0,058	19,49	0,012	12,77
23	65	0,005	11,74	0,045	17,59	0,007	12,04
24	70	0,002	11,30	0,034	15,98	0,004	11,60
25	75	0,001	11,16	0,027	14,96	-	-
26	80	0,000	11,01	0,015	13,21	-	-
27	81	-	-	0,008	12,18	-	-
28	82	-	-	0,003	11,45	-	-
29	83	-	-	0,002	11,30	-	-

2.3.1. Análisis de resultados del reactor flujo pistón (RFP).

Tras inyectar un volumen de 67,8 ml del trazador al comenzar el funcionamiento del sistema, se dio inicio a los muestreos según el planteamiento metodológico, obteniendo un total de 26 ejemplares que reflejan las etapas donde la mezcla presenta diferentes concentraciones del trazador a través del tiempo. En este sentido, para el correcto procesamiento de la información se rotuló todos los recipientes, señalando el instante en el que se tomaron las muestras, ya sea en segundos o minutos (ver Figura 12).

Figura 12

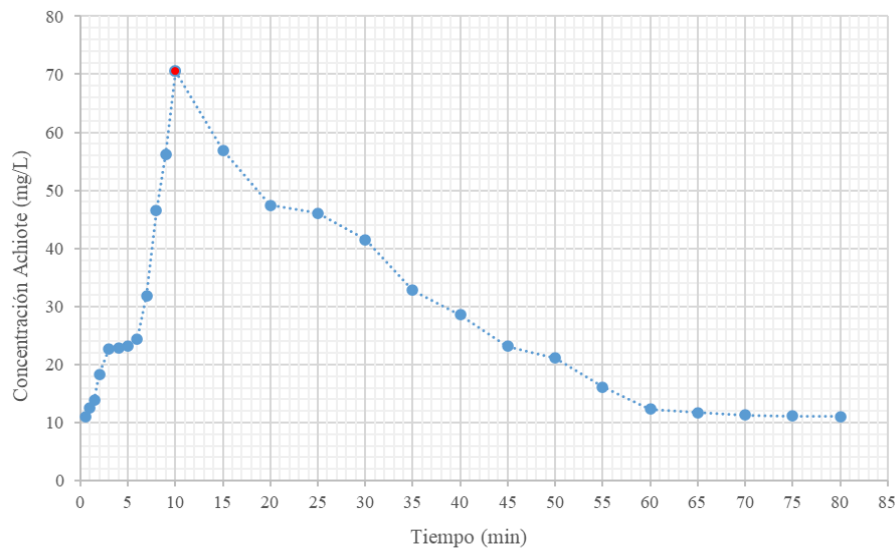
Muestras de laboratorio RFP



Para comprender visualmente el funcionamiento del RFP, se dispusieron los beaker de forma secuencial según el tiempo en el que fueron tomados los efluentes con el trazador. En este sentido, se pudo observar que durante los 2 primeros minutos las concentraciones del achioté en cada muestra tomada iba incrementando paulatinamente sin cambios notables a simple vista, sin embargo, a partir de los 3 minutos en adelante se pudo evidenciar un aumento progresivo en la intensidad del color hasta alcanzar su punto máximo a los 10 minutos específicamente en la muestra No. 12, donde se obtuvo una absorbancia de 0,407, revelando que la concentración más alta se encontraba en los 70,5 mg/L (ver Figura 13).

Figura 13

Perfil temporal de la concentración del trazador en el RFP



Al llegar a su punto máximo, la concentración del achioté tiende a decaer progresivamente a lo largo de 1 hora con 10 minutos hasta estabilizarse, en este caso la disminución de este elemento se puede observar a partir la muestra No. 13, donde se evidenció que la densidad del trazador en el RFP se reducía con el tiempo hasta disiparse completamente, tal como se observó en la muestra No. 26 en el minuto 80. Este comportamiento evidencia que el TRT no alcanza para que el trazador evacúe completamente el sistema, esto se sustenta a partir de la Figura 13, donde se aprecia una terminación prolongada y decreciente cuyos valores paulatinamente se aproximan a cero (0).

En este sentido, se puede concluir que el tiempo de retención real del RFP es mayor que el TRT. Autores como Marín et al. (2010) argumentan que esta conducta es producto de cortocircuitos en el sistema, es decir, la presencia de zonas muertas donde no hay circulación completa del fluido y existen líneas de flujos preferenciales, esto implica que la corriente de los reactivos no avanzó como un émbolo, sino que hubo una mezcla en la dirección del desplazamiento lo que se distancia de unas condiciones ideales.

Los resultados de otras investigaciones de Cano (2010) revelaron diferencias en la dinámica de los trazadores, Rodamina WT (RWT) y Cloruro de Sodio (NaCl) en reactores flujo-pistón a escala de laboratorio. El RWT mostró mayor concentración máxima normalizada, especialmente en reactores con baffles, indicando una eficiencia de mezcla superior. En contraste, el NaCl presentó picos dobles en estos reactores, sugiriendo un flujo más disperso.

La eficiencia del tiempo de detención hidráulico real varió según la configuración. Las unidades con baffles y relación L:A de 2:1 exhibieron los valores más altos de TDH real, apuntando a una mejor eficiencia hidráulica. Sin embargo, en la investigación se observó que la presencia de baffles y la relación geométrica (L:A) afectan significativamente la formación y extensión de las zonas muertas. Los reactores con baffles y una relación geométrica optimizada mostraron una mejora en la minimización de zonas muertas, lo que se reflejó en un mejor desempeño hidrodinámico y una mayor eficiencia de mezcla.

En contraposición con los análisis de Lainfiesta (2009), se evidenció un comportamiento adecuado en el TRH y la distribución del tiempo de residencia (DTR), indicando un flujo eficiente dentro del RFP helicoidal. La conductividad de los trazadores se analizó para entender la dinámica de fluidos dentro del reactor, mostrando que la concentración y el comportamiento de los trazadores seguían patrones predecibles que permiten controlar y optimizar el proceso químico.

En cuanto a las zonas muertas, que son áreas donde el flujo de reactivos es mínimo o nulo, el análisis reveló que su influencia en la eficiencia del reactor era limitada, lo cual es positivo para la optimización del proceso. Este comportamiento fue corroborado mediante estudios de

trazadores y modelos de simulación, que ayudaron a identificar y minimizar el impacto de estas zonas en el rendimiento general del reactor.

La investigación de Rodríguez y Pérez (2021), se extendió al análisis del reactor de flujo pistón (RFP), donde se evaluaron las eficiencias de conversión de metano y dióxido de carbono y se llevaron a cabo análisis dinámicos utilizando el módulo dinámico de DWSIM para evaluar el comportamiento en tiempo real del reactor. Se analizó el tiempo de residencia hidráulico (TRH) y la concentración de trazadores para identificar posibles zonas muertas dentro del reactor.

Los resultados mostraron un comportamiento adecuado en la concentración de trazadores, indicando una mínima presencia de zonas muertas. Este comportamiento se debió al diseño eficiente del reactor y a las condiciones operativas óptimas. El reactor fue modelado para asegurar un flujo homogéneo de la mezcla reactiva a través del catalizador, lo que permite una interacción efectiva entre los reactivos y el catalizador.

2.3.2. Análisis de resultados del reactor mezcla completa (RMC)

En el estudio realizado en el laboratorio de Alvernia sobre el comportamiento de la concentración de Achiote en un RMC, luego de haber suministrado un volumen de solución madre de 142,4 ml al comienzo del funcionamiento del sistema, se tomaron un total de 29 muestras rotuladas.

Al igual que en el anterior caso, dichos ejemplares se dispusieron de manera secuencial para evaluar visualmente la intensificación y dispersión del indicador. En este orden de ideas, a partir de la primera muestra se identificó inmediatamente una coloración anaranjada, y a medida que se tomaban se iban intensificando, en la muestra 4 se identificó el pico más alto, tal como se observa en la Figura 14.

Figura 14

Muestras de laboratorio RMC

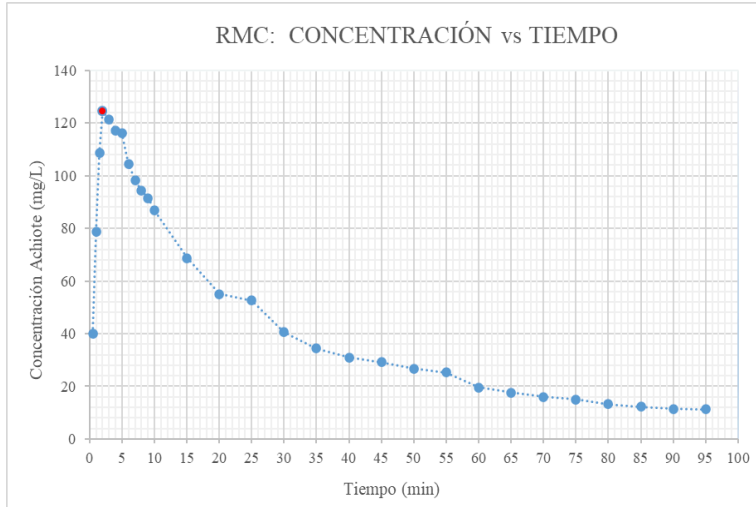


La concentración del compuesto fue determinada mediante la medición de la absorbancia aplicando la ecuación de calibración ya descrita. De esta forma, se puede decir que en las fases iniciales, el incremento de la concentración fue notable, alcanzando un máximo de aproximadamente 124,4 mg/L en la muestra número 4, registrada a los 2 minutos.

Este resultado es significativamente menor al Tiempo de Retención Teórico (TRT) calculado en 22,8 minutos, sugiriendo una rápida dispersión y mezcla del Achiote en el reactor, reflejando las características dinámicas de los sistemas de mezcla completa (ver Figura 15).

Figura 15

Perfil temporal de la concentración del trazador en el RMC



Tras el pico máximo, se observó una disminución en la concentración, indicativa de la progresiva dilución y evacuación prolongada del compuesto del reactor. Esto implica que el RMC, de forma similar al RFP, también presentó un TRT menor al tiempo de residencia hidráulico real (TRH), esto significa que probablemente existieron zonas de agitación deficientes debido a las características geométricas del reactor (Marín et al., 2010).

La tendencia decreciente post-maximización revela cómo, después de un inicio intensivo, el sistema se equilibra gradualmente, removiendo el compuesto hasta alcanzar un punto cercano a cero (0) en un plazo de 1 hora con 33 minutos. Este comportamiento destaca la capacidad del RMC para restablecer condiciones iniciales tras el tratamiento con el trazador. Sin embargo, realizando una comparación con Marín et al. (2010) se puede decir que al igual que en su trabajo de investigación, se observó que la secuencia de la gráfica en los primeros minutos, a pesar de que hubo un aumento relativamente rápido de la concentración máxima pasando de 40 a 124 mg/L en solo 2 minutos, también indicó la presencia de puntos muertos o cortocircuitos que impidieron que se efectuará una mezcla completa homogénea del trazador con el fluido desde el primer instante cuando el indicador se aplicó en el sistema.

Por su parte, Moreno (2021), en la investigación realizada, se evaluaron las eficiencias del

Reactor Mezcla Completa (RMC) mediante el uso de diferentes Tiempos de Retención Hidráulica (TRH). Los resultados revelaron que el reactor alcanzó una mayor eficiencia operativa con un TRH de 30 minutos, registrando una eficiencia superior al 80%. Este rendimiento optimizado se atribuye a la adecuada interacción entre el tiempo de retención y la capacidad de mezcla del reactor.

En lo referente a la concentración de los trazadores, se observó que su comportamiento era consistente con las expectativas teóricas, disminuyendo gradualmente con el tiempo, lo cual es indicativo de una buena operación del reactor y una eficaz mezcla de los reactantes. El análisis de las zonas muertas reveló que su presencia era insignificante, justificando este comportamiento por la eficiencia en la agitación y el diseño del reactor, que promovió un flujo homogéneo y evitó la formación de áreas donde la reacción o mezcla fuera deficiente.

El análisis detallado de Eraso y Ruiz (2015), reveló que a medida que incrementa el TRH, la eficiencia de remoción de contaminantes mejoraba, indicando una correlación directa entre el TRH prolongado y la mayor eficacia del tratamiento. En los ensayos se evidenció un TRH de 18,4 minutos para un volumen de 600 m³ y un caudal de 472.332 m³/día, lo que demostraron variaciones en la eliminación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y sólidos suspendidos totales.

El comportamiento de la concentración de los trazadores durante los estudios de DTR indicó patrones de mezcla y flujo dentro del RMC. Los análisis sugerían que existían zonas muertas o áreas de menor actividad cinética, lo cual se justificaba por la presencia de flujos heterogéneos y distribuciones irregulares de la masa dentro del reactor. Desde la perspectiva de las recomendaciones, se sugirió la necesidad de optimizar el diseño del RMC para minimizar la existencia de zonas muertas y mejorar la homogeneización del flujo.

Finalmente, Bayas y Núñez (2011) destacaron la eficiencia del RMC en comparación con otros tipos de reactores, alcanzando un factor de conversión del reactivo limitante del 79%, siendo considerado óptimo debido a su diseño que facilita un mezclado uniforme y una transferencia de calor eficiente, lo que resulta en un control más efectivo de la temperatura y la

composición de la reacción. En este caso, la agitación constante de 240 RPM con una temperatura controlada de 25 °C, fueron condiciones clave para alcanzar la máxima eficiencia.

El DTR y el TRH son indicadores críticos del rendimiento del reactor. En este estudio, los TRH fueron ajustados para optimizar las reacciones químicas, lo que resultó en una mejora significativa en la eficiencia de la conversión. Sin embargo, el análisis mostró cómo la concentración de los trazadores varió con el tiempo, esto implica que a pesar de que el diseño del RMC minimizaba las zonas muertas, aún existían áreas donde la optimización podía mejorar la eficiencia global. Este comportamiento se basó en la necesidad de mejorar la configuración del sistema de agitación y diseño de impulsores para asegurar un mezclado homogéneo y completo.

2.3.3. Análisis de resultados del reactor mezcla completa en serie (RMCS-4)

Para el análisis de resultados del Reactor Mezcla Completa en Serie (RMCS-4), se inyectó un volumen de 43,8 ml del trazador y se comenzó con la toma de muestras a intervalos específicos, siguiendo un protocolo riguroso para asegurar la precisión y relevancia de los datos recolectados. En total, se obtuvieron 24 muestras que reflejan distintos momentos del experimento, permitiendo una evaluación detallada de la dinámica de dispersión del trazador dentro del reactor, tal como se observa en la siguiente ilustración.

Figura 16

Muestras de laboratorio RMCS-4



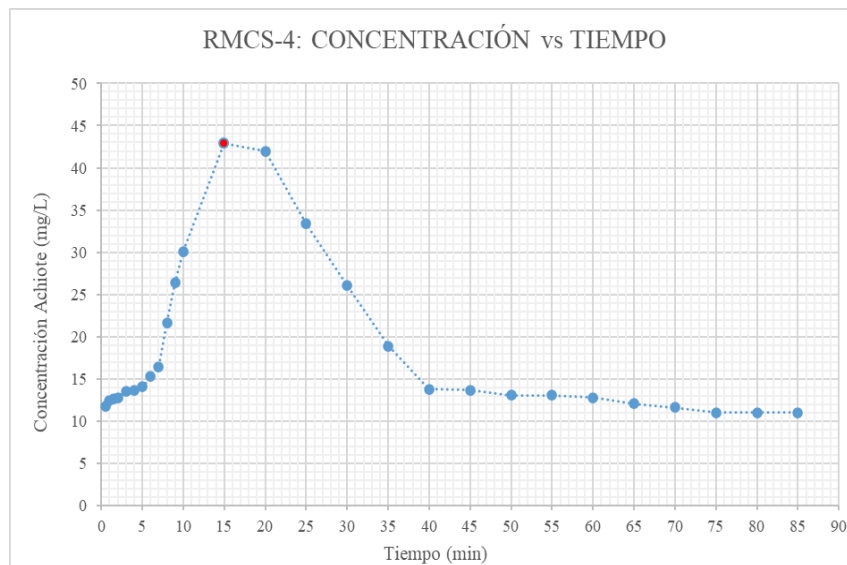
Inicialmente, se observó una concentración inicial del trazador relativamente baja, lo que indica un inicio gradual de la dispersión del mismo a través de las series de reactores. Esto se corroboró con el aumento en la intensidad de los tonos anaranjados que cada muestra reflejaba a través del tiempo. Esta fase inicial es crítica para entender cómo el trazador se incorpora y avanza a través del sistema, siendo un indicador del comportamiento hidrodinámico del RMCS-4.

En el transcurso de los muestreos subsiguientes, se notó un incremento en la concentración del trazador, evidenciando un proceso de mezcla y dispersión eficiente dentro del sistema. Este incremento es particularmente notable a partir de la muestra 10 hasta la muestra 13, donde se alcanzó una concentración pico a los 15 minutos, donde se obtuvo una absorbancia de 0,218, revelando que la concentración más alta registrada fue de 42,8 mg/L estableciéndose antes del TRT de 26 minutos (ver Figura 17).

El desarrollo de esta prueba sugiere una saturación temporal del trazador dentro del sistema, seguido de un proceso de estabilización. Este comportamiento es característico de los sistemas de reactores en serie, donde la dinámica de flujo y mezcla puede conducir a variaciones temporales en la concentración de trazadores o contaminantes.

Figura 17

Perfil temporal de la concentración del trazador en el RMCS-4



Después de alcanzar la concentración máxima y sobrepasar el TRT, los resultados indicaron una disminución gradual, donde la concentración comenzó a estabilizarse después de la muestra 18, con valores próximos a cero (0), en el transcurso de 1 hora con 10 minutos. Esta fase de declinación es esencial para determinar el tiempo de residencia efectivo y la eficiencia de mezcla del sistema.

A partir de la muestra 14 hasta la 24, se refleja una tendencia prolongada y decreciente, demostrando cómo el reactor alcanza un estado de equilibrio y la concentración del trazador se estabiliza a niveles más bajos en el transcurso de 1 hora con 25 minutos. En este orden de ideas, el trabajo de Marín et al. (2010) difiere en este punto, puesto que, a pesar de que su RMCS-6 de su investigación demostró que la concentración coincide con el tiempo de retención teórico, el RMCS-4 de esta investigación presenta su valor pico antes del TRT.

Dicho esto, se puede deducir que el tiempo de residencia real del RMCS-4 superó el valor teórico calculado, indicando la presencia de zonas muertas debidas a factores particulares del diseño y geometría del sistema. Esto evidencia que en el reactor se presentaron líneas de flujo preferencial y puntos de baja movilidad del fluido.

Estos resultados presentan poca similitud con la investigación presentada por Herrera et al. (2007), donde estudió la dechloración reductiva del percloroetileno (PCE) y del 246-triclorofenol (TCF) en un reactor de mezcla completa en fase líquida y destacaron que la remoción de 246-TCF alcanzó una eficiencia de 99,9% en un reactor anaerobio metanogénico de lecho fluidizado (RANLEF), operado a 35 °C, con un tiempo de retención hidráulica de 24 horas.

El análisis de los datos de trazadores mostró que las concentraciones normalizadas alcanzaron sus valores máximos en tiempos de retención hidráulica específicos, lo que indica la influencia del TRH en la dinámica de las reacciones. Además, el estudio reveló la presencia de zonas muertas en el reactor, lo que fue justificado por la variabilidad en la concentración de los trazadores y la necesidad de considerar diferentes tiempos de retención hidráulica para optimizar la eficiencia de la dechloración.

2.3.4. Análisis comparativo entre reactores

Tras un meticuloso análisis de los resultados obtenidos para cada reactor involucrado en el estudio, se ha elaborado la Tabla 4 detallada que recopila los datos más importantes, es decir, tanto valores teóricos como experimentales derivados de la investigación.

Dicha tabla facilita una evaluación comparativa entre los tres tipos de reactores estudiados, permitiendo una revisión específica de elementos críticos como el tiempo de retención teórico (TRT), el tiempo de retención hidráulico real (TRH), así como las concentraciones iniciales y máximas del trazador, los volúmenes del trazador aplicado, el tiempo donde se hallan los valores máximos y cercanos a cero de las concentraciones del achiote, entre otros. Estos parámetros se emplearon para evaluar la eficiencia de depuración del trazador, teniendo en cuenta aspectos como la calidad de la mezcla y el tiempo de procesamiento.

Tabla 4*Análisis comparativo - Dinámica de depuración en reactores RMC, RMCS-4 y RFP*

Tipo Reactor	Vol. Reactor (L)	Vol. Trazador Suministrado (mL)	[C] Trazador Reactor (mg/L)	Agitación (RPM)	TRT (min)	TRH Real (min)	Zonas Muertas (%)	Tiempo en Alcanzar [C] Máxima (min)	[C] Máxima Registrada (mg/L)	Tiempo Donde [C] Tiende a Cero (min)
RMC	7,12	142,4	400	50	22,88	29,26	21,8%	2	124,44	83
RMCS-4	2,19	43,8	400	50	26,01	29,26	11,1%	15	42,88	75
RFP	3,39	67,8	400	-	10,01	30,15	66,7%	10	70,44	70

Al evaluar la eficiencia de los reactores (RMC, RMCS-4, y RFP) en la depuración del trazador bajo la premisa de un flujo estable y en estado estacionario, hay varios factores clave a considerar basados en la información proporcionada en la tabla:

2.3.4.1. Tiempo de retención hidráulico (TRH). Este es un indicador crucial para determinar el tiempo real en que el trazador transita a través del reactor, lo cual es esencial para evaluar su capacidad de depuración. Un TRH más largo generalmente implica más tiempo para procesos de mezcla y reacción del tratamiento.

No obstante, se evidenció que en todos los casos de los reactores, el TRH real sobrepasó el TRT estimado, específicamente en el RFP donde se evidenció una diferencia notable de 20,14 minutos entre el dato teórico y el experimental. Seguidamente, para el caso del RMC se encontró una disparidad de 6,38 minutos, dejando al RMCS-4 como el reactor con la menor diferencia entre los valores calculados con 3,25 minutos. Esta información puede corroborarse en la tabla del Anexo D, donde se presentan los resultados del área bajo la curva y la DTR, a partir de los cuales se calcula con una sumatoria los TRH reales de cada reactor.

Los datos experimentales sugieren una diferencia poco significativa entre los tiempos de retención hidráulica de los tres tipos de reactores.

Sin embargo, Marín et al. (2010) mencionan que las diferencias entre los datos prácticos y teóricos pueden ser significativos, dependiendo del control que se tenga sobre distintas variables, por ejemplo: mantener un caudal poco variable con el fin de conservar unas condiciones ideales; evaluar las pequeñas concentraciones del trazador que pueden afectar a las muestras; el empleo de materiales nuevos y/o bien lavados; verificación de la presencia del indicador en las mangueras de salida.

2.3.4.2. Concentración inicial del trazador y volumen inicial del trazador suministrado.

Todos los reactores comenzaron con la misma concentración inicial de trazador (400 mg/L), pero la cantidad de trazador suministrada varió. Aunque esta variación refleja diferencias en el diseño y volumen de los reactores, no afecta directamente la comparación de eficiencia en términos de depuración, dado que la concentración inicial es la misma para todos.

2.3.4.3. Concentración máxima registrada. Este dato indica qué tan bien se dispersa y procesa el trazador en el reactor. Valores más bajos pueden indicar una mezcla y depuración más eficaz. Aquí, el RMCS-4 muestra la menor concentración máxima registrada (42,88 mg/L), lo que sugiere una mejor dispersión o depuración del trazador.

2.3.4.4. Tiempo con concentración máxima y tiempo cuando la concentración tiende a cero. El tiempo en alcanzar la concentración máxima es un indicador de la rapidez de la reacción inicial del sistema. El tiempo donde la concentración tiende a cero es crucial para entender la eficacia del reactor en depurar completamente el trazador. El RMCS-4 muestra una depuración efectiva en un tiempo intermedio (75 minutos), lo que sugiere una buena eficiencia general en la depuración.

2.3.4.5. Agitación. La agitación es fundamental para la mezcla efectiva y la depuración en los reactores RMC y RMCS-4, ambos con agitación de 50 RPM, lo que facilita la dispersión uniforme del trazador. El RFP no cuenta con agitación, lo que puede limitar su eficiencia de

mezcla, especialmente en aplicaciones donde la homogeneidad es crucial para la depuración, no obstante, si el RFP no requiere agitación, podría ser más eficiente en términos de mantenimiento.

Considerando estos resultados, el análisis sugiere que el RMCS-4 se destaca como el más eficiente en la depuración del trazador. La corta diferencia entre TRH real y el TRT es una ventaja clave, permitiendo que el periodo para las reacciones y mezclas necesarias en el proceso de depuración sea el más adecuado y próximo a las condiciones ideales deseadas. Esta eficiencia se ve reforzada por la menor concentración máxima registrada del trazador en el RMCS-4 que no supera los 50 mg/L.

Además, el RMCS-4 logra un equilibrio óptimo entre el tiempo requerido para alcanzar la concentración máxima del trazador y el tiempo en el que la concentración del trazador se reduce a cero, demostrando una depuración más rápida y completa, lo que permite evidenciar un bajo porcentaje de zonas muertas. La agitación a 50 RPM es otro factor crucial que facilita una mezcla uniforme y eficaz, contribuyendo a su destacada eficiencia en la depuración del trazador.

Por otro lado, el RMC, aunque efectivo, no alcanza la misma eficiencia que el RMCS-4. Su rendimiento se ve afectado por una concentración máxima más alta del trazador y un tiempo más prolongado necesario para lograr una depuración completa dada la presencia de un mayor porcentaje de zonas muertas. Sin embargo, la agitación a 50 RPM mejora significativamente su capacidad de mezcla, lo que sigue siendo un aspecto positivo en su funcionamiento.

En contraste, el RFP a pesar de su menor TRT y la ausencia de agitación, muestra una capacidad razonable para depurar el trazador. No obstante, cuando se evalúa su eficiencia global en la depuración, se sitúa por detrás del RMCS-4 y del RMC. Esto subraya la importancia de las características de mezcla y el tiempo de contacto real en la optimización de los procesos de depuración. Su particular diseño limita su eficiencia de mezcla presentando una mayor densidad de zonas muertas, lo que puede ser un factor decisivo en aplicaciones donde la homogeneidad se explica dada la diferencia tan amplia entre los tiempos de residencia teóricos y experimentales.

Bajo estas condiciones, el RMCS-4 puede presentarse como el reactor más eficiente en

términos de TRH y mejor concentración, seguido por el RMC debido a su similar diseño y funcionamiento. El RFP, aunque útil en ciertos contextos, parece ser menos eficiente en esta tarea, principalmente debido a cortocircuitos dados por sus vértices rectos (Marín et al., 2010).

2.3.4.6. Porcentaje de zonas muertas. Las zonas muertas en un reactor corresponden con los flujos donde el fluido se detiene o circula muy lentamente, aquí se utiliza la relación entre el tiempo de retención teórico (TRT) y el tiempo de retención hidráulico real (TRH) (Fogler, 2016).

Se calcula mediante la siguiente ecuación

Ecuación 9.

$$\text{Porcentaje de Zonas Muertas} = \frac{\text{TRH} - \text{TRT}}{\text{TRH}} \times 100$$

Donde:

TRT: Tiempo de residencia o retención teórica.

TRH: Tiempo de retención hidráulico real.

En resumen como se observa en la tabla 4, los porcentajes de zonas muertas para cada reactor son: RMC: 21,8%, RMCS-4: 11,1% y RFP: 66.7%, estos valores muestran que tan grande es la diferencia entre el tiempo ideal y el tiempo real de retención, reflejando el grado de zonas muertas en cada reactor, entonces:

1. REACTOR MEZCLA COMPLETA (RMC): de este modo, RCM con 21,8% de zonas muertas, presenta una eficiencia moderada en la depuración del fluido, ya que una parte significativa del volumen del reactor no está siendo aprovechada de manera eficiente, ya que la mayoría del flujo está saliendo del sistema pero aún existe un porcentaje significativo de trazador que no participa activamente en el proceso de depuración total, posiblemente debido a zonas de baja circulación o recirculación del fluido dentro del reactor (Fogler, 2016).

Sin embargo, el TRH (29,26 min) supera al TRT (22,88 min), lo que significa que el tiempo de residencia es suficiente para permitir la mezcla y la depuración total del fluido, a pesar de las áreas subutilizadas. La concentración máxima registrada 124,44 mg/L es bastante alta en comparación con RMCS-4 y RFP, lo que muestra que el reactor no es tan eficiente en la distribución del trazador sin embargo el tiempo para alcanzar la concentración máxima es de 2 min, lo que refleja una rápida respuesta inicial del sistema (Fogler, 2016).

Ahora bien, RMC logra una mezcla rápida gracias a la agitación a 50 RPM, pero su eficiencia en la depuración del fluido se ve afectada por el porcentaje de zonas muertas y la alta concentración máxima registrada, limitando así su capacidad de distribución y depuración del fluido y el trazador.

2. REACTOR MEZCLA COMPLETA EN SERIE 4 (RMCS-4): RMCS-4 con 11,1% de zonas muertas, se destaca por su alta eficiencia en comparación con RMC y RFP en la distribución del flujo y la homogeneización del fluido y el trazador. Su diseño minimiza las áreas del flujo ineficiente y optimiza el proceso de depuración del reactor, la diferencia entre TRT (26,01 min) y TRH (29,26 min) sugiere un tiempo de residencia adecuado, lo que hace que el fluido del reactor se comporte de manera ideal (Fogler, 2016).

La concentración máxima registrada es relativamente baja (42,88 mg/L), lo que refleja una dispersión eficaz del trazador, mientras que el tiempo para alcanzar la concentración es relativamente largo (15 min), lo que indica una respuesta inicial controlada y gradual del sistema (Fogler, 2016).

En resumen, el RMCS-4 es el reactor más eficiente en términos de mezcla (fluido y trazador) y depuración total del fluido por su bajo porcentaje de zonas muertas y la baja concentración máxima registrada.

3. REACTOR FLUJO PISTÓN (RFP): RFP presenta el mayor porcentaje de zonas muertas con 66,7%, lo que indica que una gran parte del fluido dentro del reactor no está siendo utilizada eficientemente, lo que resulta en una mezcla no homogénea. Este alto porcentaje de zonas

muertas sugiere que el sistema opera con un flujo no ideal, lo cual puede estar relacionado directamente con la ausencia de agitación y el diseño del reactor, el cual favorece un flujo laminar. Esto limita la interacción del trazador con el fluido, lo que reduce significativamente la eficiencia en el proceso de depuración del fluido (Fogler, 2016).

Aunque TRH (30,15 min) es mayor a TRT (10,01 min), indica un tiempo de residencia adecuado, pero el reactor no aprovecha eficientemente este tiempo debido a que las zonas muertas impiden el uso óptimo del volumen del reactor, lo que limita su rendimiento (Fogler, 2016).

La concentración máxima registrada (70,44 mg/L) es alta, lo que refleja una mala dispersión del trazador. Aunque el tiempo para alcanzar la concentración máxima es corto (10 min), el tiempo en que la concentración tiende a cero es de 70 minutos, lo que indica una depuración moderada pero aún afectada por las zonas muertas (Fogler, 2016).

Por último, el RFP presenta una eficiencia limitada en términos de mezcla y depuración total del fluido debido a su diseño y falta de agitación, A pesar de tener un tiempo de residencia adecuado, la alta proporción de zonas muertas reduce su capacidad para distribuir y depurar el trazador de manera efectiva (Fogler, 2016).

3. Conclusiones

Tras el análisis expuesto, respecto a las concentraciones del trazador en RFP se permitió evidenciar una disminución progresiva en las concentraciones de cada muestra, lo que indica una depuración paulatina del sistema. No obstante, después de estabilizar el experimento se observa que el tiempo de retención hidráulico real (TRH) es mayor que el tiempo de retención teórico (TRT), esta diferencia sugiere que el reactor presenta un flujo no ideal atribuido a cortocircuitos y zonas muertas presentes en el reactor que limitan la circulación uniforme del fluido y en consecuencia afectan de manera directa la eficiencia del reactor.

El RMC muestra un comportamiento que se caracteriza por una disminución lenta y progresiva en las concentraciones tras alcanzar el pico máximo, el TRH es mayor al TRT lo que proporciona un tiempo suficiente para la mezcla y la depuración del fluido, no obstante esta relación también sugiere que el flujo en el reactor no es ideal debido a la presencia de fenómenos no deseados como cortocircuitos y zonas muertas que impidieron una mezcla óptima en el sistema afectando su rendimiento.

El RMCS-4 se destacó como el reactor más eficiente en este estudio al lograr una rápida dispersión del trazador, el TRH se aproxima al TRT, lo que evidencia una reducción significativa de zonas muertas. La menor concentración máxima registrada en este reactor refleja una mayor eficiencia en la depuración total del trazador, mientras que su capacidad para estabilizar rápidamente la concentración demuestra su efectividad en alcanzar una mezcla homogénea. Estos factores consolidan al RMCS-4 como el sistema más eficiente evaluado en este trabajo de grado.

La presente investigación demuestra que es factible el planteamiento de una guía para la evaluación hidrodinámica de reactores como herramienta didáctica en el curso de modelación ambiental en la Universidad Mariana, destacando la importancia de comprender los principios fundamentales de la hidrodinámica en la modelación ambiental. Los resultados obtenidos en el análisis de los reactores RFP, RMC y RMCS-4 evidencian cómo el modelamiento matemático es clave para predecir y optimizar la eficiencia hidrodinámica de los sistemas, permitiendo identificar áreas de mejora, como la reducción de zonas muertas y la optimización de la distribución del trazador.

4. Recomendaciones

Se recomienda mejorar el diseño y la agitación de los reactores RFP y RMC para garantizar una mezcla más homogénea y eficiente. A pesar de los buenos resultados, la presencia de zonas muertas y flujos heterogéneos indica que se pueden hacer ajustes para optimizar el tratamiento de trazadores y mejorar el rendimiento general. Aunque los resultados observados son positivos la presencia de zonas muertas y flujos heterogéneos sugieren que los diseños actuales pueden no ser completamente eficientes.

Es importante modificar el diseño de los reactores considerando los resultados TRT y la dinámica de flujo observada. Esto permitirá mejorar la eficiencia en los tratamientos y la reducción de zonas de mezcla ineficiente, lo que contribuye a optimizar el rendimiento de los reactores.

Se sugiere realizar más pruebas con distintas concentraciones de trazador y condiciones iniciales para validar el modelo matemático y evaluar la respuesta de los reactores en diversas situaciones planteadas. Dichas pruebas permitirán validar la capacidad de adaptación del modelo, donde también se involucren el planteamiento de ecuaciones matemáticas que permitan predecir el comportamiento de diferentes fenómenos.

Referencias bibliográficas

- Aral, M. M. (2010). *Environmental Modeling and Health Risk Analysis (ACTS/RISK)*.
<https://doi.org/10.1007/978-90-481-8608-2>
- Bayas Manzano, M. y Núñez Aguagallo, C. F. (2011). Diseño y Construcción de un Reactor Continuo de Mezcla Completa [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Sistema de Biblioteca Koha, ESPOCH.
<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/1968>
- Bequette, B. W. (2013). Process dynamics: modeling, analysis, and simulation. En *Choice Reviews Online* (Vol. 35). <https://doi.org/10.5860/choice.35-6246>
- Bojaca, C., Díaz, D., Cala, F., Gutiérrez, F., Villalobos, G., Riascos, J., ... Gil, R. (2017). *Modelado Y Simulación De Sistemas Naturales*. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Brown, J. & Ikeda, T. (2015). Mathematical Applications and Modelling in the Teaching and Learning of Mathematics. *The Proceedings of the 12th International Congress on Mathematical Education*, (461), 469–473. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12688-3_42
- Caicedo, A. (2013). *Habitar Bajo Riesgo*. Universidad Nacional de Colombia.
- Cano, L. (2010). *Influencia de la Geometría, Presencia de Baffles y Sustancias Trazadoras, en la Hidrodinámica de Reactores a Escala de Laboratorio*. [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio Institucional Universidad Tecnológica de Pereira.
<https://repositorio.utp.edu.co/items/a8cafea3-bca2-4043-a7dd-2912e3fd0faa>
- Chinche Caliz, S. M. (2022). Significados que otorgan los estudiantes a las metodologías de enseñanza docente: estudio realizado en la carrera de Psicología de la Universidad Mayor de San Simón de Cochabamba – Bolivia. *Revista Boliviana de Educación*, 4(6), 80-105.

<http://portal.amelica.org/ameli/journal/742/7424482006/>

Díaz, M. (1996). *Experimentación en Plantas Piloto*.
https://www.researchgate.net/publication/286088301_Experimentacion_en_plantas_piloto.

Echeverri, L. A. y Reyes, H. (2016). Comportamiento hidrodinámico de un reactor electroquímico para recuperar residuos en la fabricación de películas semiconductoras. *Revista Facultad De Ingeniería*, 22(34), 35. <https://doi.org/10.19053/01211129.2216>.

Emanuelli, P., Milla, F., Sepúlveda, R. y Juan, T. (2013). Hoja de ruta para la implementación de proyectos piloto. *Plataforma Regional de Mecanismos de Compensación* 374(22), 374–389.

Eraso, G., y Ruiz, D. (2015). *Desarrollo de un Reactor de Mezcla Completa para el Estudio de los Coeficientes Cinéticos en Lodos Activados en el Tratamiento de Aguas Residuales*. [Tesis de pregrado, Universidad de Nariño]. Sired Udenar. <https://sired.udenar.edu.co/2519/1/91274.pdf>

Fogler, H. S. (2006). Elements of Chemical Reaction Engineering (5.a ed.). *Bioprocess Engineering*.

Hernández, E. (2014). *Hidrodinámica*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/16715/LECT147.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Harris, D.C. (2015). *Análisis químico cuantitativo* (9na ed.). McGraw-Hill.

Herrera-López, D., Rinderknecht-Seijas, N. y Poggi-Varaldo, H. M. (2007). Una Generalización del Modelo de Reacciones en Serie y Paralelo Serie para Reactores de Mezcla Completa. *Interciencia*, 32(5), 324-327. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33932506>.

Jurado, M. A. y Mercado, I. D. (2017). Revisión sistemática de técnicas no convencionales para

la evaluación de la calidad del agua de ríos contaminados con plaguicidas. *Entre Ciencia e Ingeniería*, (21), 56–65.

Lainfiesta López, D. B. (2009). *Diseño, Construcción y Evaluación de un Reactor Flujo Pistón de Forma Helicoidal Escala Laboratorio* [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. SIIDCA-CSUCA. <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/USAC.552783>.

Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering* (3.a ed.). John Wiley & Sons.

Marín, J., Soto, L., Ramírez, D. y Posso, D. (2010). *Laboratorio de Procesos de Tratamiento II Práctica 1: Comportamiento Hidráulico de Reactores*. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Área Académica de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales*. <https://www.minambiente.gov.co>, <https://shorturl.at/OuOLE>

Moreno Ayala, V. G. (2021). *Construcción y Evaluación de un Reactor Continuo de Mezcla Completa para la Reacción de Saponificación a Escala Laboratorio* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Repositorio Institucional de Acceso Abierto de la UAEM. <https://n9.cl/yntn8>

Nazaroff, W. W., & Alvarez - Cohen, L. (2001). *Environmental Engineering Science*. John Wiley & Sons.

Nolasco, M. (2006). *Estrategias de Enseñanza en Educación*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n4/e8.html#r1>.

Parra, D. M. (2003). *Manual De Estrategias De Enseñanza/Aprendizaje*. <https://www.ucn.edu.co/BibliotecaInstitucionalCemav/AyudaDI/recursos/ManualEstrategiasEnsenanzaAprendizaje.pdf>

- Peña, L. M. y Morales, J. F. (2016). La modelación matemática como estrategia de enseñanza-aprendizaje: El caso del área bajo la curva. *Revista Educación en Ingeniería*, 11(21), 64–71. <https://doi.org/10.26507/rei.v11n21.637>
- Pérez, A. y Torres, P. (2008). Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. *Revista Facultad de Ingeniería*, (45), 27–40.
- Plaza, L. F. (2016). Modelación matemática en ingeniería. *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH*, 7(13), 47–57. <https://doi.org/10.1109/FIE.1998.738891>
- Rodríguez Bonilla, M. F., y Pérez Motta, D. M. (2021). *Diseño y Simulación de un Reactor Tubular Multipropósito para Tri-Reformado de Metano* [Tesis de pregrado, Universidad ECCI]. Repositorio ECCI. <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/1556>
- Sánchez, J. y Cardona, G. (2009). Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeña escala. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (20), 65-79.
- Smith, C. A. y Corripio, A. B. (1991). *Control Automático De Procesos (Teoría y Práctica)*. (Primer-ed).-<https://pastranamoreno.files.wordpress.com/2013/02/control-automatico-de-procesos-by-vart1.pdf>
- Snape, J. B., Dunn, I. J. & Prenosil, J. E. (1997). Dynamics of environmental bioprocesses. En *Agricultural Systems* (Vol. 54). [https://doi.org/10.1016/s0308-521x\(97\)84853-6](https://doi.org/10.1016/s0308-521x(97)84853-6)
- Sperling, M. (2007). *Basic Principles Og Wastewater Treatment*. Brazil.
- Universidad del Valle [Univalle]. (2010). *Laboratorio de Procesos de Tratamiento II Práctica 1: Comportamiento Hidráulico de Reactores*. Facultad de Ingeniería, Área Académica de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Anexos

Anexo A. Marco lógico

Título	Diseño de estrategias de enseñanza aprendizaje para el curso de modelación ambiental de la Universidad Mariana.		
Objetivo General	Desarrollar una guía técnica para la evaluación hidrodinámica de reactores como estrategia enseñanza aprendizaje para el curso de modelación ambiental de la Universidad Mariana.		
Objetivos Específicos	Meta	Actividades	Resultado Esperado
Definir conceptos generales y metodología para reactores ideales.	Conceptos y metodología de los 3 reactores definidos.	Revisión de referencias bibliográficas. Definición de conceptos y metodología para cada reactor.	Conceptos y metodología de los 3 sistemas definidos.
Implementar los sistemas ideales a escala piloto.	Implementados los 3 sistemas escala piloto.	Diseño de representaciones gráficas de los reactores: RFP, RMC y RMCS-4. Selección de material para la construcción de reactores. Construcción de sistemas ideales. Implementar los sistemas en la sede Alvernia.	Implementados 3 sistemas.
Validar el funcionamiento de los sistemas implementados a través de la modelación matemática mediante el análisis de distribución de tiempos de residencia.	Validación del funcionamiento de 3 sistemas.	Formulación de modelos matemáticos para representar el funcionamiento de los sistemas. Obtención de datos teóricos a partir de la modelación. Obtención de datos experimentales a partir de pruebas en los sistemas. Calibración de modelos matemáticos con el fin de validar el funcionamiento de los sistemas implementados. Sintetizar resultados de la investigación en un documento guía.	Validar el funcionamiento de 3 sistemas.

Anexo B. Presupuesto general

Tabla 5

Presupuesto costos directos (personal)

Personal	Personas	Detalles	Total
Investigadores	1	Tabla 7	\$ 560.000
Asesoría a estudiantes	1	Tabla 8	\$ 208.000
Total Costos Directos			\$ 768.000

Tabla 6

Presupuesto costos indirectos

Ítem	Detalles	Total
Transporte	Tabla 9	\$ 81.600
Equipos	Tabla 10	\$ 1.435.000
Insumos y materiales	Tabla 11	\$ 47.000
Difusión	Tabla 12	\$ 210.000
Total Costos Indirectos		\$ 1.773.600
Total Costos Directos + Indirectos		\$ 2.541.600

Tabla 7

Presupuesto de personal (investigadores)

No. Estudiantes	No. Meses	No. Semanas	No. Horas Semanales	No. Horas Totales	Valor Hora	Inversión Total
1	4	16	7	112	\$ 5.000	\$ 560.000
Total						\$ 560.000

Tabla 8

Presupuesto de personal (asesoría a estudiantes)

Actividades	No. Meses	No. Semanas	No. Horas Semanales	No. Horas Totales	Valor Hora	Inversión Total
Asesoría	4	16	1	16	\$ 13.000	\$ 208.000
Total						\$ 208.000

Tabla 9

Presupuesto transporte

Actividades	No. Viajes	No. Personas	\$/Viaje	Total
Transporte a asesorías	16	1	\$ 3.400	\$ 54.400
Transporte Alvernia	8	1	\$ 3.400	\$ 27.200
Total				\$ 81.600

Tabla 10

Presupuesto equipos

Equipos	Cantidad	Unidad de conteo	Total
Computador	1	UND.	\$ 1.200.000
Impresora	1	UND.	\$ 200.000
Memoria USB 8 GB	1	UND.	\$ 35.000
Total			\$ 1.435.000

Tabla 11

Presupuesto de insumos y materiales

Equipos	Cantidad	Unidad de conteo	Valor unitario	Total
Resma de papel	2	UND.	\$ 20.000	\$ 40.000
Portaminas	2	UND.	\$ 1.000	\$ 2.000
Agenda	1	UND.	\$ 5.000	\$ 5.000
Total				\$ 47.000

Tabla 12

Difusiones

Difusión	Cantidad	Unidad de conteo	COSTO	
			Valor Unitario	TOTAL
Trabajo Final	2	UND.	\$ 30.000	\$ 60.000
Empastado	2	UND.	\$ 150.000	\$ 150.000
Total				\$ 210.000

Anexo C. Cronograma de la investigación

Objetivos	Actividades	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Definir conceptos generales y metodología para reactores ideales.	Revisión de referencias bibliográficas.				
	Definición de conceptos y metodología para cada reactor.				
Implementar los sistemas ideales a escala piloto.	Diseño de representaciones gráficas de los reactores: RFP, RMC y RMCS-4.				
	Selección de material para la construcción de reactores.				
	Construcción de sistemas ideales.				
	Implementar los sistemas en la sede Alvernia.				
Validar el funcionamiento de los sistemas implementados a través de la modelación matemática mediante el análisis de distribución de tiempos de residencia.	Formulación de modelos matemáticos para representar el funcionamiento de los sistemas.				
	Obtención de datos teóricos				
	Obtención de datos experimentales a partir de pruebas en los sistemas.				
	Calibración de modelos matemáticos con el fin de validar el funcionamiento de los sistemas implementados.				
	Sintetizar resultados de la investigación en un documento guía.				
	Presentación de documento guía.				

Anexo D. Resultados de DTR y TRH real en los tres tipos de reactores

Los siguientes resultados se determinaron a partir de la evaluación basada en concentraciones experimentales.

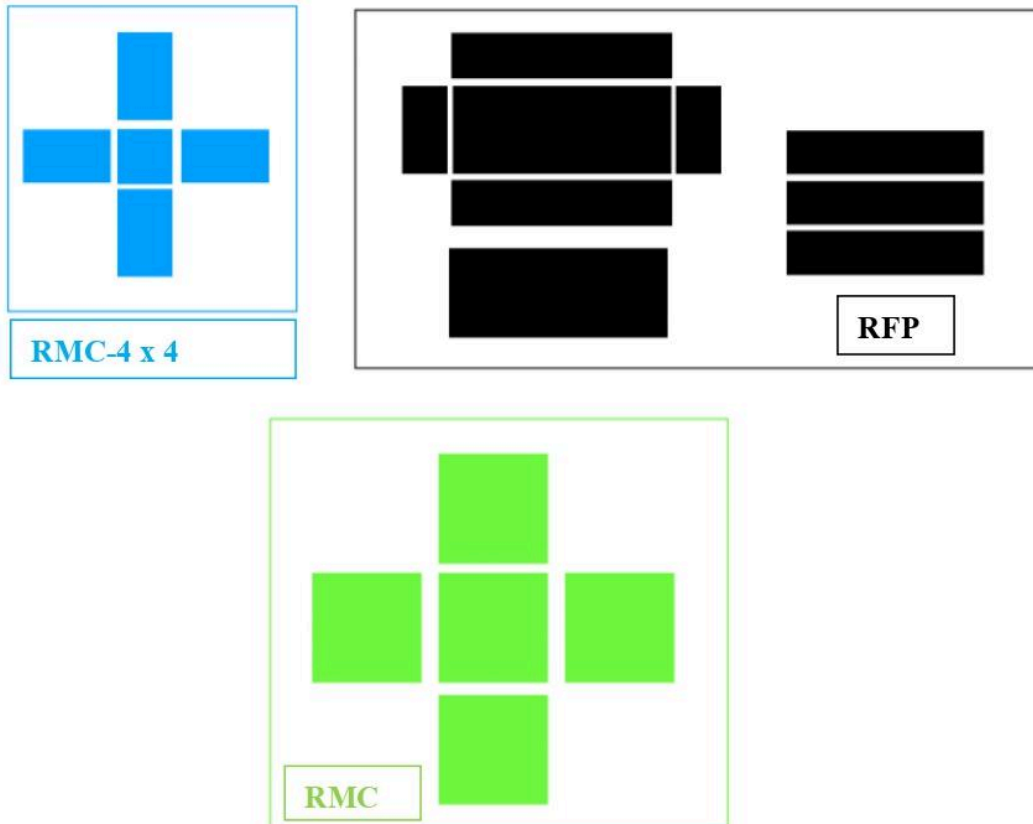
No. Muestra	Tiempo (min)	Reactor RMC				Reactor RMCS-4				Reactor RFP			
		Concentración (mg/L)	Área bajo la curva	DTR - E(t)	TRH real	Concentración (mg/L)	Área bajo la curva	DTR - E(t)	TRH real	Concentración (mg/L)	Área bajo la curva	DTR - E(t)	TRH real
1	0,50	40,100	-	0,0112	-	11,7433	-	0,0080	-	11,0125	-	0,0048	-
2	1,00	78,836	29,734	0,0221	0,0062	12,4742	6,0544	0,0085	0,0031	12,4742	5,8717	0,0054	0,0019
3	1,50	108,801	46,909	0,0305	0,0164	12,6203	6,2736	0,0086	0,0053	13,9359	6,6025	0,0061	0,0036
4	2,00	124,441	58,310	0,0348	0,0286	12,7665	6,3467	0,0087	0,0075	18,3210	8,0642	0,0080	0,0061
5	3,00	121,225	122,833	0,0339	0,0860	13,4974	13,1319	0,0092	0,0223	22,7061	20,5136	0,0099	0,0223
6	4,00	117,279	119,252	0,0328	0,1169	13,6435	13,5705	0,0093	0,0322	22,8523	22,7792	0,0099	0,0347
7	5,00	116,255	116,767	0,0326	0,1471	14,0820	13,8628	0,0096	0,0424	23,1446	22,9985	0,0101	0,0450
8	6,00	104,562	110,409	0,0293	0,1700	15,2514	14,6667	0,0104	0,0548	24,4602	23,8024	0,0106	0,0570
9	7,00	98,276	101,419	0,0275	0,1846	16,4208	15,8361	0,0111	0,0699	31,9149	28,1875	0,0139	0,0797
10	8,00	94,330	96,303	0,0264	0,2022	21,6829	19,0519	0,0147	0,0970	46,5319	39,2234	0,0203	0,1280
11	9,00	91,553	92,941	0,0256	0,2212	26,3604	24,0217	0,0179	0,1386	56,1792	51,3556	0,0245	0,1900
12	10,00	86,875	89,214	0,0243	0,2373	30,0147	28,1875	0,0204	0,1818	70,5039	63,3416	0,0307	0,2619
13	15,00	68,750	389,062	0,0192	1,3617	42,8777	182,2308	0,0291	1,5465	56,9101	318,5350	0,0248	1,7329
14	20,00	55,010	309,399	0,0154	1,5160	42,0007	212,1958	0,0285	2,5211	47,4090	260,7976	0,0206	1,9864

No. Muestra	Tiempo (min)	Reactor RMC				Reactor RMCS-4				Reactor RFP			
		Concentración (mg/L)	Área bajo la curva	DTR - E(t)	TRH real	Concentración (mg/L)	Área bajo la curva	DTR - E(t)	TRH real	Concentración (mg/L)	Área bajo la curva	DTR - E(t)	TRH real
15	25,00	52,671	269,202	0,0147	1,6959	33,3766	188,4431	0,0227	2,8786	46,0934	233,7560	0,0201	2,2891
16	30,00	40,539	233,025	0,0114	1,7943	26,0680	148,6116	0,0177	2,7746	41,5621	219,1390	0,0181	2,6228
17	35,00	34,400	187,347	0,0096	1,7048	18,9057	112,4343	0,0128	2,4808	32,7919	185,8851	0,0143	2,6293
18	40,00	31,038	163,594	0,0087	1,7177	13,7897	81,7385	0,0094	2,0810	28,5529	153,3621	0,0124	2,5030
19	45,00	29,138	150,439	0,0082	1,7902	13,6435	68,5831	0,0093	1,9789	23,1446	129,2440	0,0101	2,3906
20	50,00	26,799	139,841	0,0075	1,8598	13,0589	66,7560	0,0089	2,1528	21,0982	110,6072	0,0092	2,2866
21	55,00	25,191	129,975	0,0071	1,9106	13,0589	65,2943	0,0089	2,3273	16,1284	93,0667	0,0070	2,1265
22	60,00	19,490	111,703	0,0055	1,7984	12,7665	64,5634	0,0087	2,5204	12,3280	71,1411	0,0054	1,7803
23	65,00	17,590	92,701	0,0049	1,6222	12,0357	62,0054	0,0082	2,6310	11,7433	60,1783	0,0051	1,6369
24	70,00	15,982	83,931	0,0045	1,5863	11,5971	59,0820	0,0079	2,7075	11,3048	57,6203	0,0049	1,6928
25	75,00	14,959	77,353	0,0042	1,5702	-	-	-	-	11,1586	56,1586	0,0049	1,7720
26	80,00	13,205	70,410	0,0037	1,5279	-	-	-	-	11,0125	55,4277	0,0048	1,8696
27	85,00	12,182	63,467	0,0034	1,4661	-	-	-	-	-	-	-	-
28	90,00	11,451	59,082	0,0032	1,4475	-	-	-	-	-	-	-	-
29	95,00	11,305	56,889	0,0032	1,4734	-	-	-	-	-	-	-	-
Suma Total			3571,51		29,26		1472,94		29,26		2297,66		30,15

Anexo E. Corte Laser - Despiece

El corte láser que llevó a cabo tiene las dimensiones establecidas en los planos, Figura 4, Figura 6 y Figura 8.

CORTE LASER – DESPIECE



Anexo F. Guía técnica para la evaluación hidrodinámica de reactores.

