

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE LA
HIDRODINÁMICA DE BIORREACTORES MEDIANTE EL MÉTODO DE
ENSAYO DE TRAZADORES**

EBBY JULIANA RINCÓN LÓPEZ

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2020

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE LA
HIDRODINÁMICA DE BIORREACTORES MEDIANTE EL MÉTODO DE
ENSAYO DE TRAZADORES**

EBBY JULIANA RINCÓN LÓPEZ

**Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERA QUÍMICA**

Director

HECTOR JAVIER LUNA W.

Ingeniero químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2020

Nota de aceptación:

Jurado 1

Jurado 2

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa Ingeniería Química

Ing. Iván Ramírez Marín

Las directivas de la universidad de América, como los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A mi madre Yaneth, quien me dio la vida, por darme todo el amor que hay en su corazón para permitirme cumplir cada uno de mis sueños y deseos.

A mi padre Juan Carlos, por estar siempre a mi lado y por cada momento lleno de anécdotas y risas.

A mi tía Angélica, a quien admiro profundamente, por enseñarme a ser siempre más fuerte y sabia.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por todo el amor que me han dado, por enseñarme todo lo que sé, por guiarme a través de este camino lleno de obstáculos y alegrías, y por nunca dejarme caer.

A mi hermano, por todos esos consejos y enseñanzas que llegan cuando más los necesito, por cada día de mi vida acompañarme con risas, películas, nuevas experiencias, y mucho amor en el alma.

A mi familia, por confiar en mí y por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi vida. Por muchos años más reunidos siendo felices, los amo.

A mis amigos, Diego, Rocío, Banesa, Liz y Mauricio, por su energía preciosa e incondicional y por hacer que los días en la universidad fueran increíbles, siempre diferentes e inesperados. Agradezco a la vida por haberlos conocido.

Por último, al grupo de investigación GRESIA de la Universidad Antonio Nariño, por abrir sus puertas a nuevas ideas y por apoyarme con todo lo necesario para desarrollar este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
OBJETIVOS	22
1. GENERALIDADES	23
1.1 DESCRIPCIONES DEL MOVIMIENTO DE FLUIDOS	23
1.1.1 Perspectiva Lagrangiana	23
1.1.2 Perspectiva Euleriana	23
1.2 TIPOS DE BIORREACTORES	23
1.2.1 Reactor Anaerobio de Flujo ascendente con Lecho de lodos (UASB)	24
1.2.2 Reactor Metanogénico Escalonado (RME)	25
1.2.3 Reactor Anaerobio de Lecho fijo Estructurado (ASTBR)	26
1.2.4 Biorreactor híbrido	27
1.3 HIDRODINÁMICA	28
1.3.1 Influencia de la hidrodinámica en el reactor RME	28
1.3.2 Influencia de la hidrodinámica en el reactor ASTBR	29
1.3.3 Métodos para determinar la hidrodinámica de un reactor	29
1.3.4 Modelos hidráulicos ideales de mezcla completa o flujo pistón	30
1.4 METODO DE ENSAYO DE TRAZADORES	31
1.4.1 Trazador de flujo	31
1.4.2 Tiempo de retención hidráulico (TRH)	31
1.4.3 Modelo de dispersión	33
1.4.4 Modelo de tanques agitados en serie	34
1.4.5 Curva E	35
1.4.6 Curva F	36
1.4.7 Sensor óptico de barrera.	37
1.4.8 Software TELAK	38
2. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA HIDRODINÁMICA DEL BIORREACTOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO DE TRAZADORES	39
2.1 CONSTRUCCIÓN BIORREACTOR HÍBRIDO	39
2.1.1 Ensamblaje del biorreactor	40
2.1.2 Verificación de fugas	41
2.1.3 Construcción circuito de calentamiento	41
2.1.4 Construcción soporte de madera	42
2.1.5 Construcción del sensor óptico de barrera	43
2.1.6 Preparación de la solución coloreada del trazador	44
2.1.7 Ejecución del ensayo de trazadores	45
2.1.8 Comparación de resultados con otros autores	45
3. DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE LA HIDRODINÁMICA DE LOS REACTORES MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO DE TRAZADORES	48
3.1 DESARROLLO MATEMÁTICO LLEVADO A CABO POR LA HERRAMIENTA	48

3.2	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO TEÓRICO	51
3.3	CURVA E	51
3.4	CURVA F	52
3.5	MODELO DE TANQUES EN SERIE	52
4.	VALIDACION DE LA HERRAMIENTA ANALITICA CON LOS DATOS EXPERIMENTALES	53
4.1	VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA CON OTROS ENSAYOS DE TRAZADORES	57
5.	CONCLUSIONES	63
6.	RECOMENDACIONES	64
	BIBLIOGRAFÍA	65
	ANEXOS	67

LISTAS DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Diagrama esquemático Reactor UASB	25
Ilustración 2. Reactor RME	26
Ilustración 3. Reactor ASTBR	27
Ilustración 4. Reactor Híbrido	28
Ilustración 5. Recirculación y zonas muertas en unidades de proceso.	33
Ilustración 6. Sensor Óptico de barrera.	37
Ilustración 7. Software Telak.	38
Ilustración 8. Diseño biorreactor híbrido	41
Ilustración 9. Verificación de fugas	41
Ilustración 10. Circuito de calentamiento	42
Ilustración 11. Soporte de madera	43
Ilustración 12. Sensor óptico de barrera	43
Ilustración 13. Solución coloreada utilizada como trazador	44
Ilustración 14. Resultados Plantilla Excel Reactor Híbrido.	53
Ilustración 15. Curvas F y E para Flujo pistón y tanque agitado.	57
Ilustración 16. Paso 1- Se agregan los datos experimentales de R1.	58
Ilustración 17. Paso 2 - Copiamos la ruta de acceso y el nombre del archivo.	59
Ilustración 18. Verificación de datos iniciales correctamente cargados - R1	59
Ilustración 19. Paso 3 - Cálculos Y Resultados R1.	60
Ilustración 20. Gráfica de resultados R1.	61
Ilustración 21. Paso 4 – Resultados y Gráficas R1.	61
Ilustración 22. Paso 4 - Resultados y Gráficas R2.	62
Ilustración 23. Hoja Principal de la Herramienta	68
Ilustración 24. Hoja Resultados sin datos.	69
Ilustración 25. Ventana Paso 1 – Registro de datos experimentales.	70
Ilustración 26. Ventana Paso 2 – Ruta de Acceso y nombre de archivo de Excel.	70
Ilustración 27. Ejemplo de archivo que contiene los datos a importar	71
Ilustración 28. Hoja Resultados con datos experimentales e importados.	71
Ilustración 29. Ventana Paso 3 – Gráfica datos importados y opciones de concavidad.	72
Ilustración 30. Resultados cálculos iniciales parte 1.	72
Ilustración 31. Resultados cálculos iniciales parte 2.	73
Ilustración 32. Ventana Paso 4 - Resultados finales.	73
Ilustración 33. Gráficos Resultados finales.	74

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Curva experimental del Ensayo de trazadores.	45
Gráfica 2. Pulso-respuesta Reactor híbrido.	54
Gráfica 3. E(t) vs tiempo (min).	55
Gráfica 4. F vs θ .	56
Gráfica 5. Curva pulso-respuesta para la Replica 1.	99
Gráfica 6. Curva pulso-respuesta para la Replica 2.	100

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros de Operación de un Biorreactor	39
Tabla 2. Dimensiones del biorreactor híbrido	40
Tabla 3. Resultados ensayo de trazadores Reactor Híbrido	53
Tabla 4. Resultados Ensayo de trazadores Bioreactor 1 y 2 del autor Sergio Pérez.	58

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Tiempo de retención hidráulico.	31
Ecuación 2. Varianza normalizada para el modelo de dispersión.	34
Ecuación 3. Modelo de tanques agitados en serie	35
Ecuación 4. Curva E.	35
Ecuación 5. Integral de la curva E.	36
Ecuación 6. Normalización del tiempo.	36
Ecuación 7. Valor normalizado de la curva E.	36
Ecuación 8. Integral de la curva F.	37
Ecuación 9. Área bajo la curva de la gráfica Pulso-Respuesta	49
Ecuación 10. Tiempo medio de retención (Levenspiel).	50
Ecuación 11. Varianza	50
Ecuación 12. Varianza Normalizada.	50
Ecuación 13. Tiempo de retención hidráulico teórico del Reactor Híbrido.	51
Ecuación 14. Normalización de la curva E.	51
Ecuación 15. Tiempo normalizado.	51
Ecuación 16. Sumatoria de la integral de F.	52

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Interfaz y manual de la herramienta para el análisis de la hidrodinámica de reactores.	68
Anexo B. Código utilizado en la herramienta.	75
Anexo C. Réplicas de la ejecución ensayo de trazadores.	99

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Código utilizado en el UserForm1	75
Figura 2. Código utilizado en el UserForm2.	76
Figura 3. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 1	77
Figura 4. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 2	78
Figura 5. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 3	79
Figura 6. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 4	80
Figura 7. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 5	81
Figura 8. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 6	82
Figura 9. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 7	83
Figura 10. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 8	84
Figura 11. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 9	85
Figura 12. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 10	86
Figura 13. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 11	87
Figura 14. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 12	88
Figura 15. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 13	89
Figura 16. Código utilizado en el UserForm4 – Parte 1	90
Figura 17. Código utilizado en el UserForm4 – Parte 2	91
Figura 18. Código utilizado en el UserForm4 – Parte 3	92
Figura 19. Código utilizado en el UserForm5 – Parte 1	93
Figura 20. Código utilizado en el UserForm5 – Parte 2	94
Figura 21. Código utilizado en el UserForm6 – Parte 1	95
Figura 22. Código utilizado en el UserForm6 – Parte 2	96
Figura 23. Código utilizado en el UserForm7 – Parte 1	97
Figura 24. Código utilizado en el UserForm7 – Parte 2	98

ABREVIATURAS

UAN	Universidad Antonio Nariño
UASB	Reactor Anaerobio de Flujo ascendente con Lecho de lodos
RME	Reactor Metanogénico Escalonado
ASTBR	Reactor Anaerobio de Lecho fijo Estructurado
CSTR	Reactor de Tanque de Agitación Continua
PFR	Reactor Tubular de Flujo pistón
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
OLR	Tasa de Carga Orgánica
VBA	Visual Basic para Aplicaciones
PVC	Policloruro de Vinilo
PET	Tereftalato de Polietileno
APBR	Reactor de Lecho Empacado
DTR	Curva de Distribución del Tiempo de Residencia
PIV	Velocimetría de Imagen de Partículas
PTV	Velocimetría de Seguimiento de Partículas
LDV	Velocimetría Láser Doppler

RESUMEN

Este proyecto se basó en el desarrollo de una herramienta de interfaz gráfica, creada con la finalidad de agilizar los cálculos correspondientes para determinar el comportamiento hidrodinámico de un biorreactor híbrido y otras configuraciones de reactores, conociendo así su tipo de flujo (Flujo pistón o Mezcla completa), todo a partir de los datos obtenidos experimentalmente utilizando el método de ensayo de trazadores que junto con sus procedimientos matemáticos se encuentran detalladamente expuestos por Octave Levenspiel en su libro "Tracer technology, Modeling the flow of fluids, fluid mechanism and its applications".

La parte experimental de este proyecto de investigación fue llevada a cabo en los laboratorios de la Universidad Antonio Nariño (UAN), comenzando con la construcción del biorreactor híbrido, el cual nace con la intención de crear un tipo de biorreactor que sea capaz de degradar una mayor concentración de carga orgánica presente en el alimento de este.

Este reactor híbrido se basó en el funcionamiento de los reactores RME (Reactor Metanogénico Escalonado) y ASTBR (Reactor Anaerobio de Lecho Fijo Estructurado), por lo cual además de ser un reactor de flujo ascendente y manejar un diámetro variable con materiales traslucidos en sus diámetros más pequeños (Acrílico, tereftalato de polietileno (PET)), tiene en su parte superior (Tubo policloruro de vinilo (PVC)) espumas de polietileno de baja densidad sujetas con dos mallas metálicas, para aumentar la retención de biomasa y del mismo modo aumentar el tiempo de contacto de los microorganismos con el alimento, aumentando la producción de biogás.

A continuación, se realizó la construcción del biorreactor híbrido para poder llevar a cabo el ensayo de trazadores empleando colorante para alimentos verde como trazador junto con otras herramientas para la toma de datos (Sensores Ópticos de Barrera, bombas peristálticas, mangueras, Software TELAK). Una vez se ejecutó la captura de los datos, se procedió a realizar los cálculos indicados por Levenspiel, demostrando que el biorreactor híbrido tiene un comportamiento combinado de flujo pistón y mezcla completa, lo cual se evidenció en los resultados obtenidos de estos cálculos y las gráficas obtenidas de los mismos, adicionalmente se obtuvo que el tiempo de retención hidráulico (TRH) experimental (17,586h) es mayor al teórico (12,24h) y que su funcionamiento corresponde a 3,6 reactores de tanque agitado en serie del mismo tamaño usando un caudal de 5,5mL/min.

Posteriormente, se utiliza el programa Microsoft Excel para desarrollar la herramienta por medio de lenguaje de programación VBA (Visual Basic para aplicaciones) configurándola para llevar a cabo los cálculos correspondientes para validar los datos obtenidos experimentalmente, omitiendo de esta manera el arreglo matemático manual del que consta el ensayo de trazadores, debido a que es una tarea repetitiva y dispendiosa que puede ser mejorada.

Finalmente, los resultados obtenidos durante la ejecución del método de ensayo de trazadores son introducidos en la herramienta para que esta realice los cálculos correspondientes para determinar el comportamiento de un fluido en el interior del biorreactor híbrido, lo cual valida los datos obtenidos experimentalmente al inicio de este proyecto de investigación, demostrando así, que la herramienta es completamente funcional y que los datos de la hidrodinámica de este biorreactor son correctos.

PALABRAS CLAVES

Biorreactor híbrido, Trazador, Tipo de Flujo, Hidrodinámica, Herramienta de análisis.

ABSTRACT

This project was based on the development of a graphical interface tool, created with the purpose of speeding up the corresponding calculations to determine the hydrodynamic behavior of a hybrid bioreactor and other reactor configurations, thus knowing their type of flow (Plug flow or Complete mixture), all based on data obtained experimentally using the tracer test method that, together with its mathematical procedures, are detailed in detail by Octave Levenspiel in his book "Tracer technology, Modeling the flow of fluids, fluid mechanism and its applications".

The experimental part of this research project was carried out in the laboratories of the Antonio Nariño University (UAN), beginning with the construction of the hybrid bioreactor, which was born with the intention of creating a type of bioreactor that is capable of degrading a higher concentration of organic load present in the food of this.

This hybrid reactor was based on the operation of the RME (Stepped Methanogenic Reactor) and ASTBR (Structured Fixed Bed Anaerobic Reactor), for which in addition to being an upflow reactor and handling a variable diameter with translucent materials in their diameters smaller (Acrylic, polyethylene terephthalate (PET)), It should in its upper part (Polyvinyl chloride (PVC) tube) low density polyethylene foams secured with two metal meshes, to increase biomass retention and in the same way increase the contact time of microorganisms with food, increasing biogas production.

Next, the construction of the hybrid bioreactor is carried out to be able to carry out the tracer test using green food coloring as a tracer along with other tools for data collection (Optical Barrier Sensors, peristaltic pumps, hoses, TELAK Software). Once the data capture is executed, the calculations indicated by Levenspiel are carried out, showing that the hybrid bioreactor has a combined behavior of plug flow and complete mixing, which is evidenced in the results obtained from these calculations and the graphs. Obtained from them, additionally it is obtained that the experimental hydraulic retention time (TRH) is equivalent to 17.586h is greater than the theoretical one (12,24h) and that its operation corresponds to 3,6 stirred tank reactors in series of the same size using a flow rate of 5,5mL/min.

Subsequently, the Microsoft Excel program is used to develop the tool by means of the VBA (Visual Basic for Applications) programming language, configuring it to carry out the corresponding calculations to validate the experimentally obtained

data, thus omitting the manual mathematical arrangement of which Tracer testing is included, since it is a repetitive and time-consuming task that can be improved.

Finally, the results obtained during the execution of the tracer test method are entered into the tool for the corresponding calculations to determine the behavior of a fluid inside the hybrid bioreactor, which validates the data obtained experimentally at the beginning of this research project, thus demonstrating that the tool is fully functional and that the hydrodynamic data of this bioreactor are correct.

KEYWORDS

Hybrid Bioreactor, Tracer, Flow Type, Hydrodynamics, Analysis Tool.

INTRODUCCIÓN

Conocer el comportamiento de los fluidos dentro de las distintas unidades de proceso como los reactores, intercambiadores de calor, torres de absorción, entre otros es uno de los puntos más importantes a tener en cuenta a la hora de evaluar el desempeño de estos equipos, dado que a partir de dicha información hidrodinámica es posible determinar el tipo de flujo que se da en su interior, consiguiendo de esta manera evitar errores de cálculo creados por asumir que la unidad de proceso maneja flujos idealizados como el flujo pistón o mezcla completa, ya que el único estudio que puede confirmar su verdadero comportamiento es el ensayo de trazadores.¹

Este consiste en la inyección de una sustancia inerte (trazador) al interior de cualquiera de estas unidades de proceso, con el fin de que realice el recorrido a través de estas, y posteriormente en el efluente debe haber un equipo que sea capaz de reconocer la presencia del trazador, tomando datos periódicamente para conseguir una curva experimental a partir de la cual se realizarán los cálculos para determinar el tipo de hidrodinámica real que posee dicho equipo.

Según Octave Levenspiel, en la práctica inicial de la ingeniería, cuando el diseñador asumía un flujo de pistón o un flujo mixto del fluido a través de una unidad de proceso, por lo general se cometían grandes errores.² El ensayo de trazadores se realizó para comprobar de qué manera se comportaría un reactor de diámetro variable que emplea espumas de polietileno en su interior, ya que según ensayos realizados previamente tanto en reactores ASTBR y RME los resultados determinaron que este tipo de reactores manejaban un comportamiento de mezcla completa, de modo que lo esperado para el reactor híbrido también sería que su tipo de flujo fuera mezcla completa.³

Por lo tanto, este proyecto busca sustraer este arreglo manual mediante el uso de una herramienta que permita obtener resultados inmediatos y más acertados, y así mismo reducir el tiempo del análisis de este ensayo en los proyectos que están desarrollando en la UAN en conjunto con el Grupo de Investigación en Recursos, Ecología, Sostenibilidad e Ingeniería Ambiental (GRESIA).

¹ LEVENSPIEL, Octave. Tracer technology, fluid mechanics and its applications. 2012. Pg. 5.

² Ibid. Pg. 6.

³ OTALORA, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de Pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 58.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta para el análisis de la hidrodinámica de biorreactores mediante el método de ensayo de trazadores.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar experimentalmente la hidrodinámica de un biorreactor híbrido utilizando el método de ensayo de trazadores.
- Desarrollar la herramienta de análisis de los ensayos de trazadores utilizando el método de pulso-respuesta.
- Validar la herramienta de análisis de ensayos de trazadores con valores de diferentes tipos de biorreactores.

1. GENERALIDADES

En este capítulo, inicialmente se profundiza en los conceptos más importantes para el desarrollo y la validación de la herramienta de interfaz gráfica, así como los conceptos que permitan entender cómo se comporta un fluido en el interior de un biorreactor. Se explicarán, además, las principales configuraciones de biorreactores que son utilizados para la obtención de biogás en la UAN y cómo influyen estas configuraciones en la hidrodinámica de estas.

1.1 DESCRIPCIONES DEL MOVIMIENTO DE FLUIDOS

Las magnitudes que tiene un fluido cuando se encuentra en movimiento se mantienen estables en función de la posición y del tiempo, estas magnitudes se pueden describir de dos formas en mecánica de fluidos: si se sigue el desplazamiento en función del flujo de una partícula fluida concreta se denomina Lagrangiana y está en función del tiempo; y si se fija la atención en un punto del espacio y se contempla el flujo de diferentes partículas a través de él, se denomina Euleriana y está en función de la posición.⁴

1.1.1 Perspectiva Lagrangiana. Si las magnitudes físicas no se refieren al punto del espacio, si no a la partícula fluida que pasa en un instante por ese punto, se plantea el estudio desde esta perspectiva. Existen casos especiales en los cuales presenta inconvenientes, por ejemplo, en el caso del flujo unidimensional, no estacionario, de un gas no viscoso, esta descripción da lugar a expresiones y cálculos complejos que, en general, limitan su uso.⁵

1.1.2 Perspectiva Euleriana. Si las magnitudes físicas no siguen a las partículas fluidas, sino que se refieren en un punto por el cual fluyen partículas, se plantea el estudio desde esta perspectiva. En esta, la posición y el tiempo son variables independientes, sin embargo, se puede establecer una conexión entre estas expresando que los valores de las partículas que pasan por un punto, cuya posición coincide en un instante determinado con la del punto, son iguales a los de la descripción euleriana en dicho punto e instante.⁶

1.2 TIPOS DE BIORREACTORES

Los biorreactores son dispositivos específicos que albergan sistemas biológicos de distinta clase para lograr un fin en particular, entre estos destacan la producción de metabolitos o sustancias de interés o la degradación de

⁴ RIPOLL, Antonio. Fundamentos y Aplicaciones de la Mecánica de Fluidos. 2005. Pg. 19.

⁵ DE LAS HERAS, Salvador. Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas. 2011. Pg. 39.

⁶ Ibid. Pg. 40.

compuestos o materiales problemáticos. Se pueden clasificar de diversas formas, una de ellas es según la necesidad de oxígeno requerida por el sistema biológico, clasificándose principalmente en sistemas aerobios o sistemas anaerobios.⁷

En los laboratorios de la UAN correspondientes a la investigación llevada a cabo por el Grupo GRESIA, se realizan diferentes procesos de digestión anaerobia para el estudio de la producción de biogás, entre ellos se analiza la aplicación del proceso productivo en diferentes configuraciones de biorreactores, donde las opciones más relevantes para este proyecto serán expuestas a continuación:

1.2.1 Reactor Anaerobio de Flujo ascendente con Lecho de lodos (UASB).

Su uso principal es para el tratamiento de aguas residuales con altas cargas orgánicas a través de la digestión anaerobia. Se considera polifásico, ya que el sustrato se encuentra en fase líquida, la biomasa contenida en el lodo se encuentra en fase sólida, y por último el biogás obtenido se encuentra en fase gaseosa. En general, los patrones de flujo UASB tienen grandes cantidades de mezcla. La mezcla se produce parcialmente por la circulación del líquido, pero principalmente por la producción de biogás.⁸

Según la investigación realizada por Hall en 1985, esta configuración de reactor no presenta desviaciones importantes en comparación con el comportamiento del reactor de tanque de agitación continua (CSTR), por lo tanto, se considera que en el interior del reactor se da un flujo de mezcla completa, lo que permite que exista una mayor área de contacto, y a su vez mayor producción de biogás.⁹

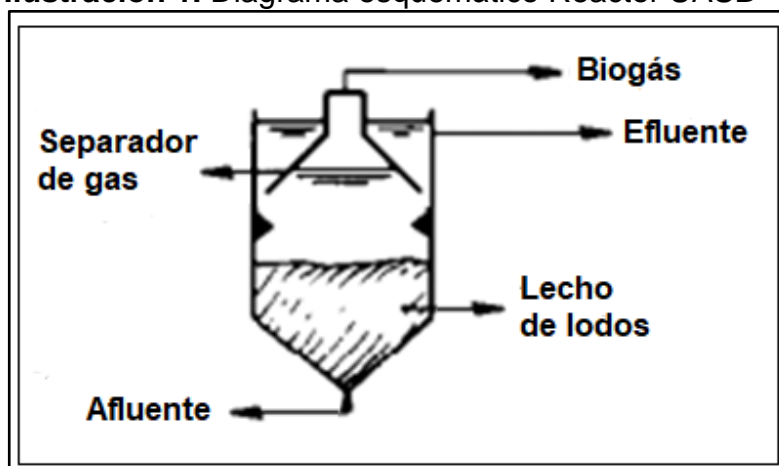
A continuación, en la **ilustración 1** se presenta el diagrama esquemático del reactor UASB.

⁷ DORAN, Pauline M. Principios de ingeniería de los bioprocesos.1995. Pg. 12.

⁸ LOPEZ, Ivan. UASB reactor hydrodynamics: residence time distribution and proposed modelling tools. 2010. Pg. 592.

⁹ HALL, Eric. Non-intrusive Estimation of Active Volume in anaerobic reactors. 1985. Pg. 48-49.

Ilustración 1. Diagrama esquemático Reactor UASB



Fuente: LETTINGA, Gatzke. Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment, Especially for Anaerobic Treatment. Pg. 701.

1.2.2 Reactor Metanogénico Escalonado (RME). En el año 2017 los autores Michael Mietzner, Rajesh Beri y Edward Gunderson patentaron una nueva configuración de biorreactor, basada nuevamente en el biorreactor UASB, en la que se describe un tanque de biorreactor con diámetro variable que cuenta con tres secciones para la producción de material biológico.¹⁰

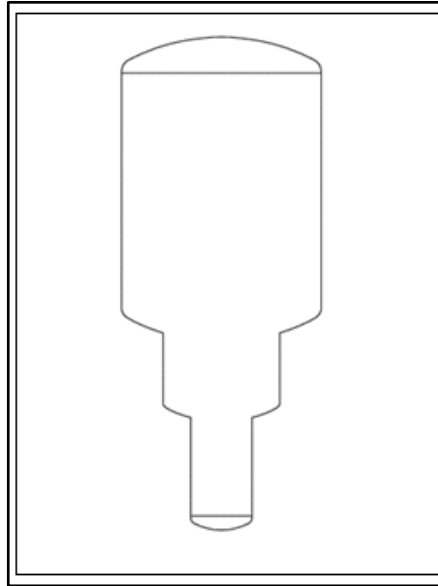
Este tanque incluye una primera sección con un diámetro específico para contener en él un medio de cultivo líquido, una segunda sección con un diámetro aumentado con relación al de la primera sección con lo que se logra un aumento de volumen, y una tercera sección que aumenta nuevamente el volumen y el diámetro, el esquema de la estructura del reactor RME se muestra en la **ilustración 2**.

En el trabajo investigativo de Paulo de Miranda, se demuestra que, en el interior de este biorreactor, el comportamiento del fluido es de mezcla completa, es decir, consecuente con el comportamiento CSTR, por lo tanto, se considera apto para la producción de biogás, y se adapta a la línea de investigación del grupo GRESIA.¹¹

¹⁰ MIETZNER, Michael. Patente No. US2017/0369828 A1. 2017. Pg. 4.

¹¹ MIRANDA, Paulo. Avaliação da biometanização do hidrolisado hemicelulósico obtido pela auto-hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas anaeróbios de duplo estágio e um estágio na presença de carvão ativado em pó. Tesis de Posgrado. Universidad Federal de Ouro Preto. 2018. Pg. 52-54.

Ilustración 2. Reactor RME



Fuente: MIETZNER, Michael.
Patente No. US2017/0369828 A1.
2017. Pg. 4.

1.2.3 Reactor Anaerobio de Lecho fijo Estructurado (ASTBR). Está basado en el reactor de lecho empacado (APBR), donde el principio de funcionamiento de ambos radica en la operación de la formación de biopelículas por parte de los microorganismos en el material interno, con fines principalmente de tratamiento de aguas residuales.¹²

La diferencia de la configuración de reactor ASTBR se presenta en la matriz de soporte, la cual permanece fija en el reactor, lo que permite una mayor adhesión de biomasa y a su vez mayor tiempo de retención celular proporcionando ventajas de crecimiento y mayores velocidades de conversión de sustrato¹³, brindar baja sensibilidad a los cambios ambientales en variables como el pH o la temperatura o elevar el rendimiento del sustrato empleado, además de requerir menos energía de entrada ya que la biomasa está adherida a lo largo del reactor¹⁴.

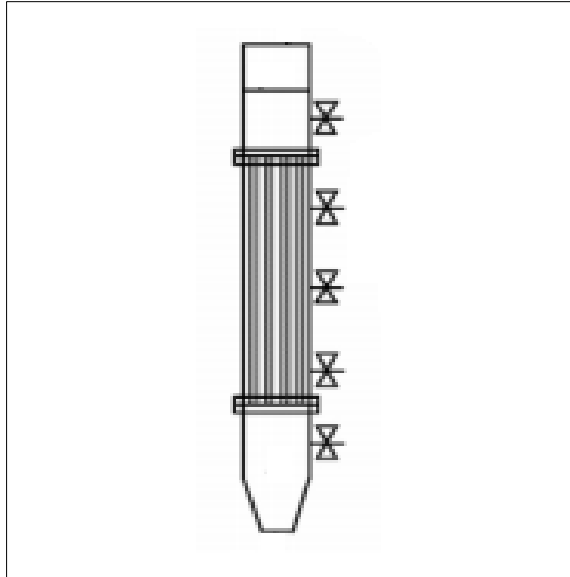
En seguida, en la **ilustración 3** se presenta el esquema del reactor ASTBR.

¹² BLANCO, Vivian., FUESS, Lucas., ZAIAT, Marcelo. Calcium dosing for the simultaneous control of biomass retention and the enhancement of fermentative biohydrogen production in an innovative fixed-film bioreactor. 2019. Pg. 3.

¹³ CHAN, Yi., CHONG, Mei., LAW, Chung. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. Pg. 1-18.

¹⁴ FUESS, Lucas. Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse. 2017. 189, Pg. 2.

Ilustración 3. Reactor ASTBR

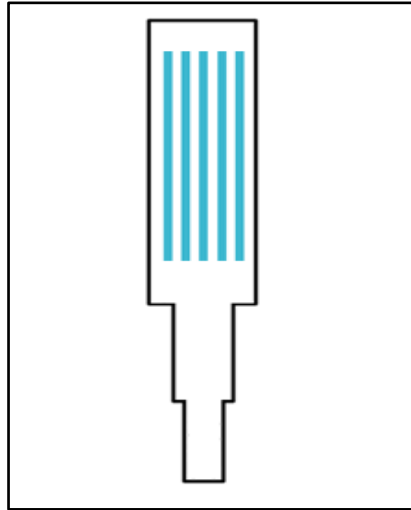


Fuente: FUESS, Lucas. Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse. 2017. Pg. 4.

1.2.4 Biorreactor híbrido. De acuerdo con las configuraciones anteriormente mencionadas, se propone una configuración basada en la unión del reactor RME y el ASTBR, en la cual se mantiene el diseño escalonado, variando los diámetros de las tres secciones que lo componen, adicionalmente, se utiliza un lecho fijo estructurado compuesto por varias espumas de polietileno de baja densidad fijadas internamente a una malla metálica.

Debido a que este tipo de biorreactor combina las características de los dos reactores mencionados anteriormente, se espera que sea apto para la producción de biogás. Estas características son un flujo de mezcla completa al interior del reactor ocasionados por los cambios de diámetro que se encargan de generar remolinos en el interior de este para conseguir un mezclado constante, y por otro lado un soporte de adhesión de biomasa que se agrega para aumentar el tiempo de contacto entre las bacterias y el sustrato promoviendo así la producción de biogás en la digestión anaerobia, su estructura se presenta en la **ilustración 4**.

Ilustración 4. Reactor híbrido



Fuente: elaboración propia

1.3 HIDRODINÁMICA

En el área de los bioprocesos el conocimiento de la hidrodinámica y la cinética son indispensables ya que a través de estos se puede lograr un incremento en la eficiencia de los procesos¹⁵, principalmente cuando se manejan reactores con comportamiento de mezcla completa ya que cuando se tiene un mezclado continuo y homogéneo, durante toda la operación se promueve contacto de los microorganismos con el agua residual con la materia orgánica a disolver.

1.3.1 Influencia de la hidrodinámica en el reactor RME. Principalmente esta configuración tiene un comportamiento en el cual se puede denotar una mezcla completa, en relación con los reactores CSTR. Esto debido a que se construyó como una mejora del reactor UASB el cual también presenta un comportamiento de mezcla completa en su interior, en relación con eso se entiende que la principal razón del aumento de diámetro en las diferentes secciones del reactor es para que a medida que el fluido avanza por el reactor se formen remolinos debido al cambio abrupto de volumen, logrando un comportamiento de mezcla completa.¹⁶

¹⁵ GIÁCOMAN, Germán. Análisis de la Hidrodinámica de un reactor en Flujo pistón. 2003. Pg. 7.

¹⁶ PÉREZ, Sergio., Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR). Tesis de pregrado. 2020. Pg. 64.

1.3.2 Influencia de la hidrodinámica en el reactor ASTBR. En el trabajo de grado de Fabián Otálora¹⁷, se comparan las curvas de distribución del tiempo de residencia usando el ensayo de trazadores por el método de pulso-respuesta usando cloruro de litio como trazador, se comparan con el modelo de dispersión teórico descrito por Levenspiel en el cual se determina que el comportamiento del reactor ASTBR tiene un 18% de comportamiento de flujo pistón debido a que el tubo del efluente del reactor es un tubo de un diámetro menor.

El reactor cuenta con un 18.25% funcionando como flujo pistón y un 81.74% como mezcla completa, lo cual permite un contacto del sustrato con los microorganismos tanto en el espacio líquido del reactor como en el lecho fijo estructurado en el interior de este.¹⁸

El comportamiento hidrodinámico del reactor ASTBR fue estudiado utilizando la técnica de curva de distribución del tiempo de residencia (DTR). La DTR fue determinada experimentalmente a través del ensayo estímulo-respuesta por pulso usando Cloruro de litio como trazador.¹⁹

1.3.3 Métodos para determinar la hidrodinámica de un reactor. Existen distintos métodos para determinar la hidrodinámica de un reactor, los cuales son:²⁰

- **Velocimetría de imagen de partículas (PIV):** es utilizado para medir el campo de velocidad instantánea en una sección transversal plana del flujo observado. Con el PIV, la velocidad del fluido se determina midiendo el desplazamiento de pequeñas partículas trazadoras durante un pequeño intervalo de tiempo.²¹
- **Velocimetría de seguimiento de partículas (PTV):** esta es una técnica para medir velocidades y trayectorias de objetos en movimiento, estos objetos son partículas neutralmente boyantes que se suspenden en el flujo de fluidos. Y se rastrean partículas individuales. Existen dos métodos experimentales de PTV:

¹⁷ OTALORA TAPIERO, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de Pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 58.

¹⁸ Ibid. Pg. 58.

¹⁹ Ibid. Pg. 59.

²⁰ OYEGBILE, Benjamin., AKDOGAN, Guven. Hydrodynamic Characterization of Physicochemical Process in Stirred Tanks and Agglomeration Reactors. 2018. Pg. 4.

²¹ ATKINS, Michael. Velocity Field Measurement Using Particle Image Velocimetry. 2016. Pg. 8.

- ✓ **PTV bidimensional (2-D):** las mediciones se realizan en una porción 2D, iluminada por una fina lámina láser (un plano delgado); una baja densidad de partículas sembradas permite rastrear cada una de ellas individualmente para varios fotogramas.
- ✓ **PTV tridimensional (3-D PTV):** es una técnica experimental que se basa en un sistema de cámara múltiple en una disposición estereoscópica, se ilumina de forma tridimensional un volumen de observación, y se graba una secuencia de tiempo de imágenes estereoscópicas de objetivos ópticos (partículas trazadoras de flujo iluminadas), determinando su posición 3D instantánea en el espacio mediante el uso de técnicas fotogramétricas y el seguimiento de su movimiento en el tiempo, obteniendo así un conjunto de trayectorias 3D de los objetivos ópticos.
- **Velocimetría láser Doppler (LDV):** se ha aplicado ampliamente para caracterizar el flujo de líquido, la mezcla y la disipación de energía en una variedad de situaciones de flujo, incluyendo biorreactores agitados. La alta resolución espacial de LDV combinada con su capacidad para seguir fluctuaciones rápidas en la velocidad lo convierten en una herramienta importante para el estudio de la turbulencia. Un velocímetro Doppler láser mide las velocidades de fluido locales e instantáneas mediante la detección de la frecuencia de la luz dispersada por pequeñas partículas suspendidas en el fluido a medida que pasan a través de un patrón de flecos o interferencias.²²

1.3.4 Modelos hidráulicos ideales de mezcla completa o flujo pistón.

- **Modelo ideal Mezcla completa:** el reactor de tanque de agitación continua (CSTR) o reactor de mezcla completa supone un flujo de alimentación y salida uniforme y una agitación perfecta, esto es, en todos los puntos del reactor la composición y propiedades físicas del fluido son iguales. Por esta misma razón la corriente de salida tiene la misma composición y propiedades que el fluido que se encuentra en el interior del reactor. La operación del reactor se realiza en condiciones de estado estacionario, es decir, no existe acumulación dentro del reactor, por lo tanto, desaparece la variable tiempo.²³
- **Modelo ideal Flujo Pistón:** el reactor tubular de flujo pistón (PFR) se caracteriza porque el flujo de fluido cuando pasa a través de este reactor es ordenado, sin que ningún elemento de este sobrepase o se mezcle con

²² DORAN, Pauline M. Principios de ingeniería de los bioprocesos. 1995. Pg. 15.

²³ LOPEZ, Iván., BORZACCONI, Liliana. Introducción al diseño de reactores. 2009. Pg. 11.

cualquier otro elemento situado antes o después de aquel, es decir, no hay mezcla en la dirección de flujo (dirección axial). Como consecuencia, todos los elementos de fluido tienen el mismo tiempo de residencia dentro del reactor.²⁴

1.4 METODO DE ENSAYO DE TRAZADORES

1.4.1 Trazador de flujo. Un trazador de flujo es cualquier propiedad de flujo utilizada para realizar un seguimiento de los patrones de flujo, magnitud, dirección y circulación. Los trazadores pueden poseer distintas propiedades químicas, como material radiactivo, o compuestos químicos, propiedades físicas, como densidad, temperatura, salinidad o tintes, y pueden ser naturales o artificialmente inducidos. Los trazadores de flujo se utilizan en muchos campos, como física, hidrología, limnología, oceanografía, estudios ambientales y estudios atmosféricos.²⁵

1.4.2 Tiempo de retención hidráulico (TRH). El tiempo de retención Hidráulico, se define como el tiempo que permanece una sustancia al interior de un reactor en estado estacionario, este tiempo teórico se halla empleando la razón entre el volumen del reactor y el flujo volumétrico que maneja el mismo como se muestra en la ecuación 1.²⁶

Ecuación 1. Tiempo de retención hidráulico

$$RTD = \frac{\text{Volumen}}{\text{Caudal}}$$

Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Químicas. 2004. Pg. 258.

Existen dos tipos de flujo ampliamente estudiados, los cuales son Flujo pistón y Mezcla completa, estos flujos presentan un comportamiento bastante diferente, que son propios de los reactores PFR y CSTR respectivamente, y dependiendo de la cinética, el volumen del reactor, el estado de agregación de los reactivos y del producto de interés, se realizan los cálculos para escoger el diseño del tipo de reactor que sea más adecuado para la obtención de dicho producto, sin embargo, el comportamiento real de muchos de estos equipos se desvía considerablemente de los cálculos realizados asumiendo alguno de estos flujos idealizados.

²⁴ Ibid. Pg. 12.

²⁵ STUTTER, Marc., DEEKS, Lynda. Transport of conservative and reactive tracers through a naturally structured upland podzol field lysimeter. 2005. Pg. 6.

²⁶ LEVENSPIEL, Octave. Ingeniería de las reacciones Químicas. 2004. Pg. 257.

Razón por la cual es indispensable conocer el comportamiento real de las distintas unidades de proceso (intercambiadores de calor, Reactores, Torres de absorción, entre otros) para determinar cómo es su funcionamiento, y a cuál de estos dos tipos de flujo se asemeja más.

Existen tres factores que afectan el patrón de flujo, los cuales son²⁷:

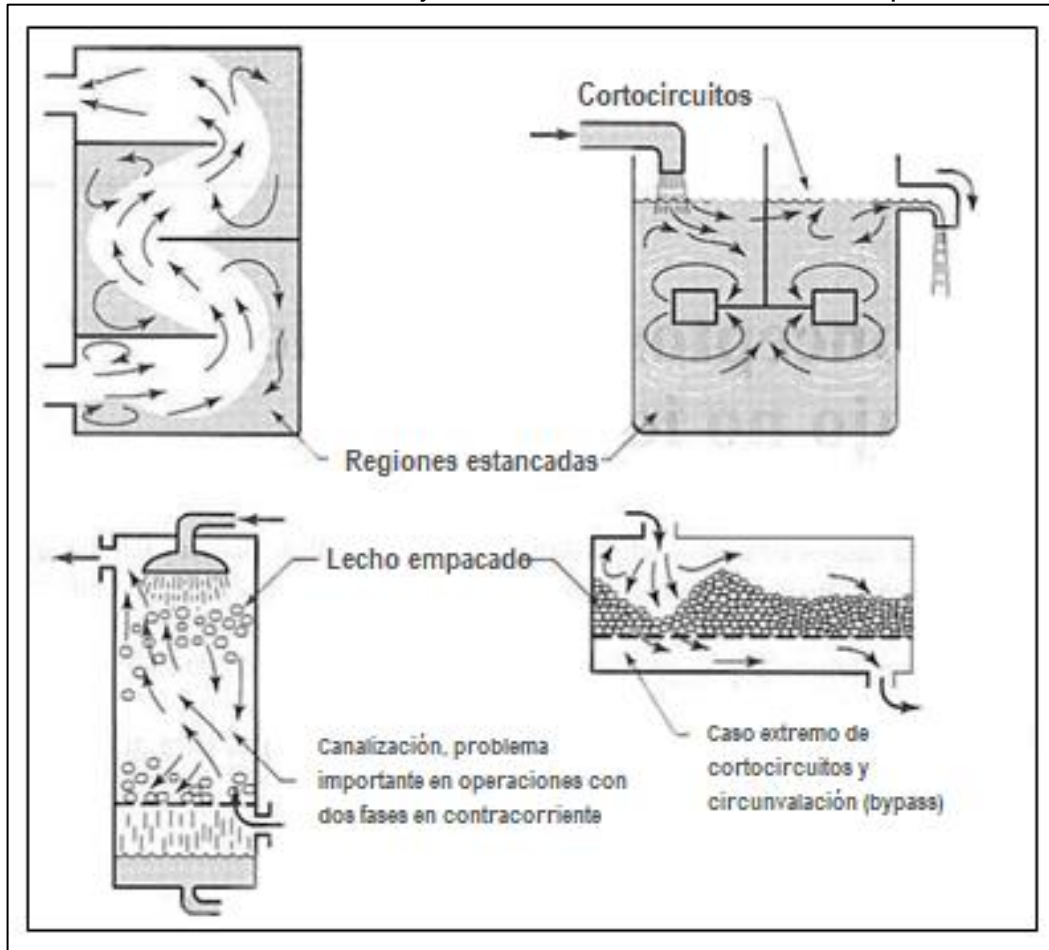
- La distribución de tiempos de residencia TRH, de la corriente que fluye a través del reactor.
- El estado de agregación del material que fluye y su tendencia a formar grupos de moléculas que se mueven juntas.
- El mezclado inmediato o tardío del material del reactor.

Las desviaciones de la distribución de los tiempos de residencia son causadas debido a la canalización/recirculación del fluido o por la creación de zonas muertas en el reactor. Como se muestra en la **ilustración 5**.²⁸

²⁷ Ibid. Pg. 257.

²⁸ Ibid. Pg. 258.

Ilustración 5. Recirculación y zonas muertas en unidades de proceso.



Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Químicas. 2004. Pg. 258.

A continuación, se presentan dos modelos que sirven para representar el flujo en recipientes reales para realizar el escalamiento y para identificar el flujo defectuoso, estos modelos son el modelo de dispersión y el modelo de tanques CSTR en serie, los cuales son relativamente equivalentes, por lo cual es posible emplear uno u otro para determinar el tipo de flujo empleado por el reactor o unidad de proceso.

1.4.3 Modelo de dispersión. Este modelo puede emplearse cuando se asume que el trazador que se inyecta en un pulso sobre el fluido que entra a un reactor para luego comenzar un proceso de dispersión conforme pasa a través del recipiente, el modo de caracterización de esta dispersión es suponiendo un proceso similar a la difusión en el flujo pistón ideal.²⁹

El coeficiente de dispersión D (m^2/s) se ve representado de la siguiente manera:

²⁹ Ibid. Pg. 293.

- Un valor grande de **D** indica una rápida dispersión de la curva del trazador y corresponde a Flujo mezcla completa.
- Un valor pequeño de **D** indica una dispersión lenta y corresponde a Flujo mezcla completa.
- **D = 0** indica que no hay dispersión, por lo tanto, el flujo correspondería a Flujo pistón.

Del mismo modo, la expresión adimensional $\frac{D}{uL}$ Caracteriza el valor de la dispersión en todo el recipiente.³⁰

- $\frac{D}{uL} \rightarrow 0$, Posee una dispersión mínima, por lo que equivale a flujo pistón.
- $\frac{D}{uL} \rightarrow \infty$, Posee una gran dispersión, por lo que equivale a tanque agitado.

Para hallar el valor de $\frac{D}{uL}$ a partir de los datos de la curva experimental Concentración/señal Vs tiempo, se deben hallar los valores de Varianza (σ^2) y la media (\bar{t}), para obtener la varianza normalizada σ_θ^2 . y finalmente hallar el valor de la dispersión en todo el recipiente despejando la **ecuación 2**.³¹

Ecuación 2. Varianza normalizada para el modelo de dispersión.

$$\sigma_\theta^2 = 2 \frac{D}{uL} - 2 \left(\frac{D}{uL} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{uL}{D}} \right)$$

Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Químicas. 2004. Pg. 259.

1.4.4 Modelo de tanques agitados en serie. El modelo de tanques en serie es un modelo ampliamente utilizado debido a su sencillez, ya que puede utilizarse en cualquier cinética y puede extenderse sin mucha dificultad a cualquier arreglo de recipientes o compartimientos, que cuenten con o sin recirculación. Adicionalmente permite representar equivalencias con configuraciones de reactores no ideales como el RME o el reactor híbrido, y la manera de calcularlo es muy sencilla, ya que del mismo modo que en el Modelo de dispersión se utiliza el valor de la varianza Normalizada σ_θ^2 , como se muestra en la ecuación 3.³²

³⁰ Ibid. Pg. 293.

³¹ Ibid. Pg. 306.

³² Ibid. Pg. 323.

Ecuación 3. Modelo de tanques agitados en serie

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N}$$

Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Química. 2004. Pg. 259.

Donde N equivale al número de tanques CSTR en serie al que corresponde el recipiente, unidad de proceso, o tipo de reactor sobre el cual se realizó el ensayo de trazadores.

1.4.5 Curva E. La curva E presenta físicamente la distribución de las edades de un fluido que sale de un recipiente, esto sucede debido a que los elementos del fluido toman caminos distintos a lo largo del reactor y el área bajo la curva de esta función equivale a 1. Es necesario calcular los datos para la construcción de esta curva debido a que ayuda a obtener la curva F de forma más sencilla ya que se usan datos de una curva adimensional.³³ Y el procedimiento para hallarlo es el siguiente:

- Se realiza la normalización de los datos obtenidos experimentalmente de Concentración/Señal dividiendo cada valor experimental por el área total bajo la curva S(t).

Ecuación 4. Curva E.

$$E(t) = \frac{S(t)}{A}$$

Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Química. 2004. Pg. 259.

- Se calcula la integral de E(t) con los datos de tiempo obtenidos experimentalmente.

³³ SÁNCHEZ, Cardona. Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas de pequeña escala. 2009. Pg. 71-73.

Ecuación 5. Integral de la curva E.

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

Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Química. 2004. Pg. 259.

1.4.6 Curva F. La curva F se utiliza para representar visualmente la concentración acumulada del trazador a la salida del reactor, en función de la concentración inicial, esta función varía entre cero y uno,³⁴ y se calcula de la siguiente manera:

- Se normaliza el valor del tiempo usando la media (\bar{t}) previamente calculada para dividir cada uno de los valores de tiempo.

Ecuación 6. Normalización del tiempo.

$$\theta = \frac{t_i}{\bar{t}}$$

Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Química. 2004. Pg. 260.

- Se calcula el valor normalizado de E(t) multiplicando cada uno de sus valores por la media.

Ecuación 7. Valor normalizado de la curva E.

$$E_{\theta} = E(t)\bar{t}$$

Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Química. 2004. Pg. 260.

- Se calcula la integral de F.

³⁴ Ibid. Pg. 71-73.

Ecuación 8. Integral de la curva F.

$$F = \int_0^{\infty} E_{\theta} d\theta$$

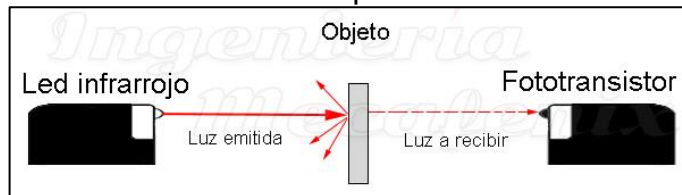
Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Química. 2004. Pg. 261.

- Y finalmente se calcula una columna de datos que contenga el acumulado de la integral F, cuyo valor máximo de esta debe ser la unidad, y se realiza la gráfica F Vs θ .

1.4.7 Sensor óptico de barrera. Los sensores ópticos son capaces de detectar la presencia de objetos a distancia a través del cambio de intensidad de luz, y basan su funcionamiento en la emisión de un haz de luz que es ininterrumpido o reflejado por el objeto a detectar como se muestra en la **ilustración 6**.

Los sensores ópticos de barrera funcionan bajo el mismo concepto, con la diferencia de que se usa un objeto que interfiere con la emisión de la señal emitida por parte del led infrarrojo hacia la fotorresistencia, para el caso del ensayo de trazadores se dispuso de un sensor óptico de barrera conectado a la salida del reactor por medio de moldes de silicona, que tenía como objeto intermedio un tubo de vidrio de 8mm de diámetro, a través del cual pasaba el trazador para posteriormente salir del reactor y así el sensor reconocería la presencia del trazador inyectado.

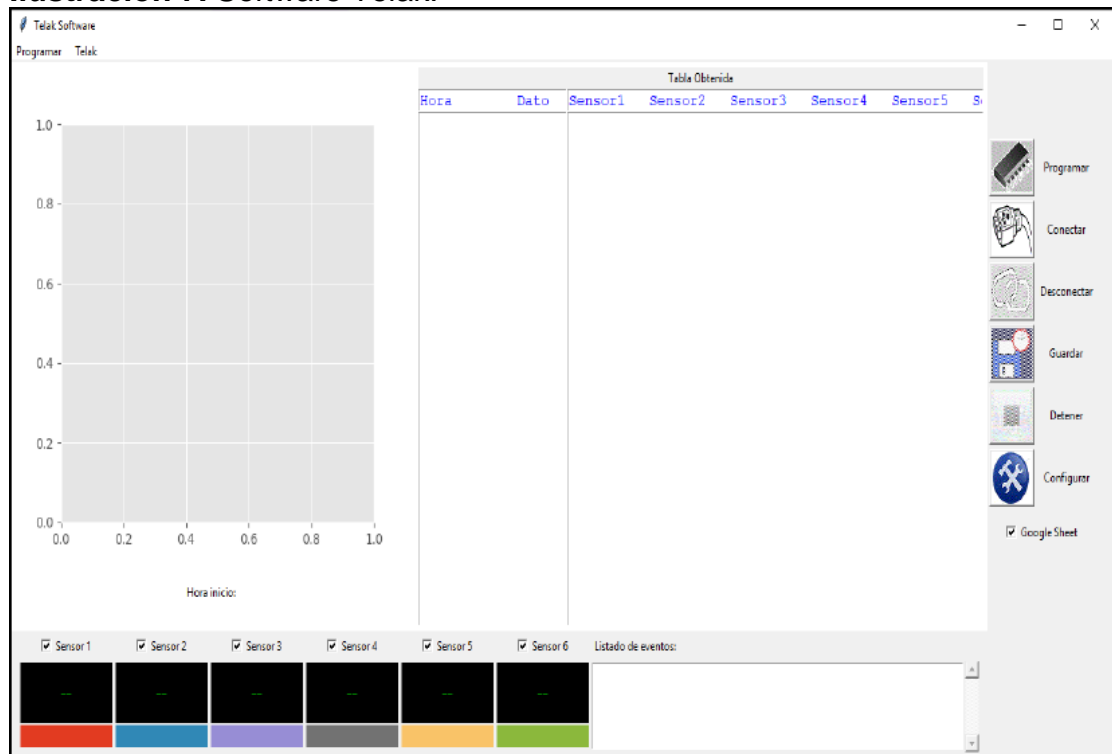
Ilustración 6. Sensor Óptico de barrera.



Fuente: la enciclopedia de la ingeniería, 2018. [consultado: 20 de Julio 2020] Disponible en: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensor-optico/>.

1.4.8 Software TELAK. Es un programa desarrollado por el grupo de investigación GRESIA de la Universidad Antonio Nariño el cual se encarga de registrar y almacenar los datos emitidos por los sensores ópticos de barrera, este programa es capaz de procesar la información de hasta 6 sensores a la vez, además de graficar los datos obtenidos a partir del segundo dato registrado, ajustando la gráfica en tiempo real y puede configurarse para tomar datos escogiendo el intervalo de tiempo, posteriormente los datos son almacenados en un archivo formato “.db” (base de datos) que puede ser abierto por Microsoft Excel, su interfaz gráfica se muestra en la **ilustración 7**.

Ilustración 7. Software Telak.



Fuente: elaboración propia con base en software Telak.

2. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA HIDRODINÁMICA DEL BIORREACTOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO DE TRAZADORES

La hidrodinámica se define como el estudio del movimiento de los líquidos, analizando sus consecuencias y comportamiento específico, conocer esta información es crucial para el correcto diseño, operación y análisis de resultados de los biorreactores y los procesos biológicos llevados a cabo en ellos.³⁵

En este proyecto tras realizar una meticulosa construcción del biorreactor se requiere determinar la hidrodinámica de la configuración híbrida (RME y ASTBR), aspecto que se abordó a partir de la ejecución del método de ensayo de trazadores, el cual permite conocer cuál es el comportamiento del flujo líquido a medida que avanza lo largo del reactor. Todos los componentes requeridos para la realización de la construcción y la ejecución del método de ensayo de trazadores se explicarán y detallarán a lo largo de este capítulo.

2.1 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR HÍBRIDO

Según el autor Sergio Pérez en 2020³⁶, los principales parámetros para tener en cuenta para la construcción del biorreactor son principalmente los mostrados en la tabla 1:

Tabla 1. Parámetros de operación de un biorreactor RME y ASTBR.

Parámetro	Valor
Temperatura (°C)	35
pH	6,5 – 7,5
TRH teórico (h)	12
Caudal teórico (mL/min)	5,6
OLR (mg/L)	4000

Fuente: elaboración propia con base en PÉREZ, Sergio. Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR). Tesis de pregrado. 2020.

³⁵ DOMINGO, Agustín. Apuntes de Mecánica de fluidos. Pg. 5.

³⁶ PÉREZ, Sergio. Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR). 2020. Pg. 43-44.

2.1.1 Ensamblaje del biorreactor. Inicialmente se tiene un diseño de tres secciones que aumentan ascendentemente su diámetro, en la sección inferior, es decir la de menor diámetro, se utilizó un tubo de acrílico de 1,5 pulgadas, que permitía visualizar esta sección inferior, debido a su transparencia. Posteriormente, la sección media fue construida con una botella de tereftalato de polietileno (PET) con un diámetro de 2,4 pulgadas, en el cual también se permite visualizar su interior, estas medidas tienen una relación entre los cambios de diámetro de 1,6:1. Si se desea agregar un nivel más en la sección superior o inferior, debe mantenerse la relación del aumento de los diámetros en todo el biorreactor.³⁷

Por último, la sección superior fue construida con un tubo de policloruro de vinilo (PVC) con un diámetro de 4 pulgadas el cual no es transparente debido a que en esta sección se encuentra el lecho fijo estructurado de espumas de polietileno de baja densidad, por lo tanto, no era necesario observar el comportamiento del fluido en esta sección. Las dimensiones del reactor híbrido se presentan en seguida en la **tabla 2**.

Tabla 2. Dimensiones del biorreactor híbrido

Dimensiones	Medida
Altura (m)	0,85
Altura útil (m)	0,75
Longitud (m)	0,585
Área (m ²)	0,23
Volumen (mL)	4040

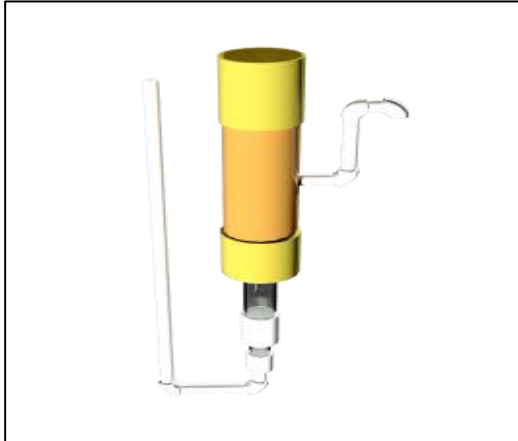
Fuente: elaboración propia

Los materiales utilizados para el ensamblaje de este biorreactor híbrido fueron elegidos debido a su alta resistencia y hermeticidad, fácil mantenimiento y limpieza, y su bajo costo. Estas tres secciones fueron unidas por medio de silicona gris de gran adhesión y pegamento para PVC. A su vez, entre las secciones se dispuso de reductores de diámetro, que son accesorios complementarios que permiten unir tuberías PVC de diámetros diferentes.

El esquema del reactor híbrido construido se muestra en la **ilustración 8**.

³⁷ MIETZNER, Michael. Patente No. US2017/0369828 A1. 2017. Pg. 12.

Ilustración 8. Diseño biorreactor híbrido



Fuente: elaboración propia, realizado en Autodesk 3ds Max.

2.1.2 Verificación de fugas. Una vez se encontraban unidas las tres secciones correspondientes se procedió a verificar posibles fugas originadas por características propias de los materiales, cambios de presión, condiciones de la instalación, entre otras. Para llevar a cabo esta verificación de fugas se realizaron pruebas hidráulicas, llenando el reactor con agua hasta su aforo, comprobando así que no existieran escapes del fluido en ninguna sección del reactor. Además de esto, las fugas encontradas fueron selladas con silicona gris para evitar anomalías en el comportamiento del reactor, como se muestra en la **ilustración 9**.

Ilustración 9. Verificación de fugas



Fuente: elaboración propia

2.1.3 Construcción circuito de calentamiento. Debido a que uno de los parámetros a tener en cuenta para la construcción del biorreactor es la temperatura, se construyó un control del sistema de calentamiento, el cual se compone de un cable de resistencia ($15 \text{ W m}^{-1} - 120 \text{ V}$) y un termostato digital (W1209 control temperatura), al cual va conectada una sonda de temperatura

para líquidos (Diycore DS18B20) ubicada dentro del reactor, y que a su vez está conectada al cable de resistencia. El principio fundamental del termostato es establecer un valor en el set point que permite controlar y observar en pantalla el valor de temperatura, que en este caso es de 35°C. El circuito de calentamiento se presenta en la **ilustración 10**.

Ilustración 10. Circuito de calentamiento



Fuente: elaboración propia

2.1.4 Construcción soporte de madera. Después de ensamblar las tres secciones del reactor, se procedió a la construcción e implementación del soporte de madera, el cual consta principalmente de 4 piezas de madera con dimensiones de 5x4 cm con grosor de 6mm dispuestos verticalmente a lo largo del reactor para evitar deslices o tambaleos, y otras 2 piezas de madera con dimensiones iguales pero dispuestas horizontalmente como base para las anteriores piezas con un largo mucho menor, como se muestra en la **ilustración 11**.

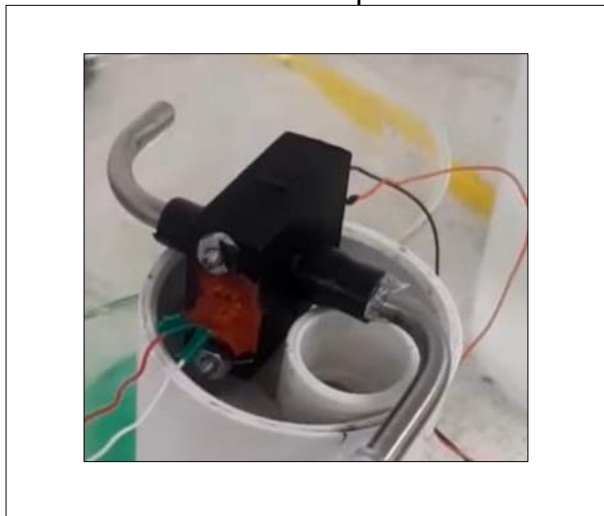
Ilustración 11. Soporte de madera



Fuente: elaboración propia

2.1.5 Construcción del sensor óptico de barrera. Consta de dos piezas de acrílico negro, elaboradas para proteger los complementos utilizados, y para evitar que existan perturbaciones en la señal por la luz del ambiente. Dentro de las cuales en uno de los extremos se emplea una fotorresistencia y en el otro un led infrarrojo, a través de estas dos piezas se encuentra un tubo de vidrio de 8mm de diámetro, por el cual pasa la solución coloreada del trazador. El sensor óptico se muestra en seguida en la **ilustración 12**.

Ilustración 12. Sensor óptico de barrera

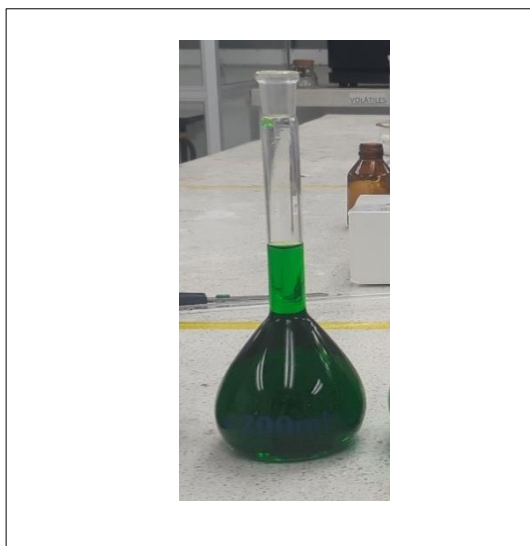


Fuente: Elaboración propia

2.1.6 Preparación de la solución coloreada del trazador. Debido a que el trazador que se utiliza en el ensayo de trazadores debe ser inerte, se realizó una solución coloreada agregando 10mL de colorante líquido artificial para alimentos “Verde Navidad” de la marca COLORISA, en un balón aforado de 100mL que contenía agua destilada con el fin de facilitar la inyección del trazador en el interior del reactor³⁸. Esta solución coloreada fue almacenada en el balón aforado anteriormente mencionado, y se utilizó tanto para el ensayo de trazadores, como para la calibración del sensor óptico de barrera empleado.

La selección de este colorante fue con base en la teoría de los colores con contraste complementario rojo y verde, ya que el sensor óptico tiene en su interior un led infrarrojo, por lo tanto, cuando el trazador pase a través de la celda existirá un cambio en el valor de la señal recibida por el sensor, debido a que el color verde del colorante absorbe por completo la luz emitida por el led infrarrojo, logrando así que la fotorresistencia no pueda absorber ningún tipo de luz.

Ilustración 13. Solución coloreada utilizada como trazador



Fuente: elaboración propia

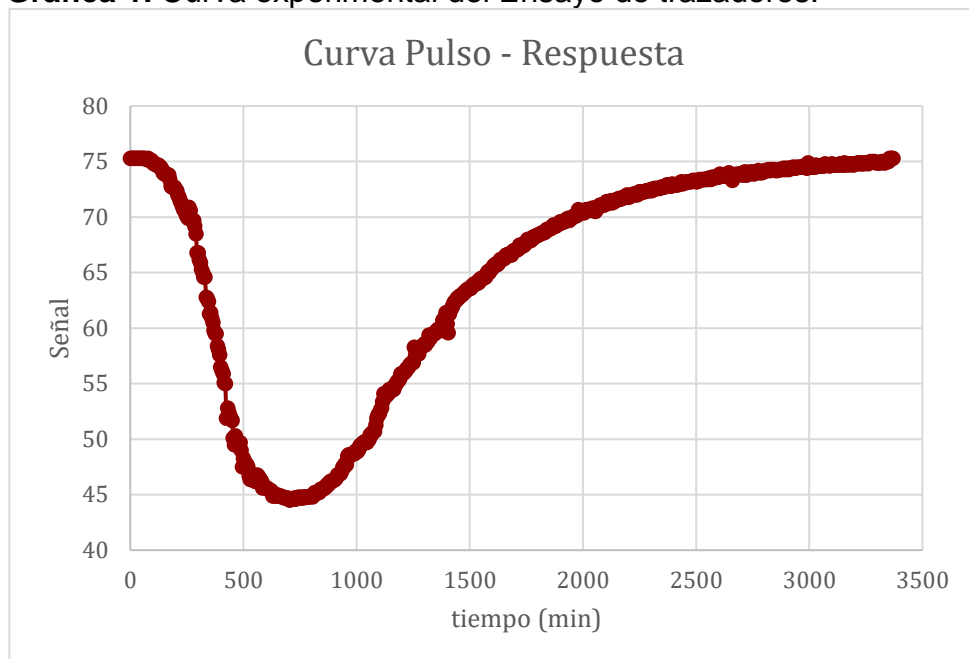
Teniendo en cuenta que el sensor únicamente tiene que reconocer la presencia del trazador a la salida del reactor, y que el volumen del reactor es grande a comparación del pulso que se inyecta en este, se puede decir que no es relevante la selección del colorante para el ensayo ya que este trazador se encuentra a altas concentraciones. Sin embargo, se recomienda utilizar el color verde para disminuir posibles errores o perturbaciones.

³⁸ PÉREZ, Sergio., Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR). Tesis de pregrado. 2020. Pg. 45

2.1.7 Ejecución del ensayo de trazadores. Posterior a la calibración del sensor, se procedió a realizar el ensayo de trazadores, el cual inicio con agua destilada pasando a través del reactor durante 174,6mins (aproximadamente 3h). Posteriormente, pasadas las 3h de paso de agua en el reactor, se realizó un pulso de 10mL de la solución coloreada del trazador en la entrada del reactor.³⁹

En su totalidad este ensayo tuvo una duración de 3370 minutos (aproximadamente 56,16h), con el software TELAK configurado para tomar datos cada 5mins, conservando un caudal de 5,5mL/min. A continuación, se presenta la **gráfica 1** obtenida gracias a los datos registrados experimentalmente en el ensayo.

Gráfica 1. Curva experimental del Ensayo de trazadores.



Fuente: elaboración propia

El análisis hidrodinámico de los datos experimentales obtenidos en el ensayo se presenta en el siguiente capítulo detallando paso a paso cada uno de los cálculos realizados.

2.1.8 Comparación de resultados con otros autores. El autor Paulo de Miranda Cordeiro en su proyecto investigativo referente a la hidrólisis de caña de azúcar en medios anaerobios empleando carbón activado, obtuvo resultados referentes a la hidrodinámica particular de la configuración de reactores empleados, utilizó un volumen de reactor de 2,3L, un tiempo de retención hidráulico de 18,4h, una temperatura de 35°C, un flujo de operación de

³⁹ LEVENSPIEL, Octave. Tracer technology, fluid mechanics and its applications. Chapter 1. The Tracer Method. 2012. Pg. 1-3.

2,1mL/min, y una configuración de dos etapas, con un reactor de lecho fijo de flujo ascendente seguido de otro reactor anaerobio escalonado.⁴⁰

El reactor de flujo ascendente fue manejado con un tiempo de retención hidráulica de 10,4h superior al tiempo de retención teórico estimado el cual fue de 8h debido a la implementación de espumas de polietileno de baja densidad, también al realizar el ajuste numérico referente a la cantidad de tanques agitados en serie se obtuvo que la cantidad de reactores CSTR fueron 1,67.

En cuanto a la configuración de reactor anaerobio escalonado, el tiempo de retención hidráulica fue de 18.01h, siendo muy cercano al valor teórico del tiempo de retención en este caso de 18.4h exponiendo que el escalonamiento favorece la mezcla completa en una región determinada. Por último, tras aplicar nuevamente el modelo de tanques agitados en serie, el valor obtenido para este apartado fue de 2,3 reactores CSTR.⁴¹

Por otro lado, el autor Fabián Otálora, quien evaluó la producción de biogás empleando licor de pentosas en un reactor metanogénico escalonado, estudió y analizó la hidrodinámica de su reactor empleando el método de ensayo de trazadores, por medio de un trazador inerte de Cloruro de Litio.⁴²

Tras analizar la hidrodinámica de este reactor metanogénico, se observan resultados favorables a su ejecución exitosa como lo es el tiempo de retención hidráulica, el cual fue de 8.73h, resultado que al ser comparado al tiempo teórico de retención hidráulica (8h) es mayor, alejándose eventualmente de este valor por aspectos del biorreactor tales como la velocidad de la bomba de alimentación o la formación de biomasa entre otros.⁴³

En cuanto al análisis de la hidrodinámica del biorreactor acidogénico, se observa que el biorreactor está operando con 8.73h de TRH, conociendo que teóricamente el TRH era de 8h, esta fluctuación es normal en la operación de sistemas continuos y está dada por la variabilidad en los métodos operaciones. Según el modelo de tanques agitados en serie, se determina que el reactor acidogénico está compuesto por 3.7 reactores CSTR en serie.⁴⁴

⁴⁰ CORDEIRO, Paulo. Avaliação da biometanização do hidrolisado hemicelulósico obtido pela auto- hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas anaeróbios de duplo estágio e um estágio na presença de carvão ativado em pó. 2018. Pg. 86.

⁴¹ Ibid. Pg. 87-88.

⁴² OTALORA, Fabian. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. 2018. Pg. 58.

⁴³ Ibid. Pg. 58.

⁴⁴ Ibid. Pg. 58.

El interior del reactor cuenta con un flujo distribuido con un 18.25% de flujo pistón y un 81.74% de mezcla completa lo cual garantiza un contacto del sustrato con las bacterias presentes tanto en el espacio líquido del reactor como en el soporte fijo suspendido al interior de este.⁴⁵

La aplicación de estos ensayos permite determinar que tanto el tiempo de retención, como el volumen del reactor, y el caudal determinado en el momento de realizar el ensayo de trazadores, son parámetros fundamentales para los resultados obtenidos del modelo de tanques agitados en serie.

Adicional a esto, en comparación con los resultados obtenidos en este proyecto, se observa que debido a la variabilidad de los parámetros fundamentales para este ensayo, el tiempo de retención hidráulico aumenta significativamente, por lo tanto, el número de reactores de tanque agitado en serie aumenta consecuentemente a este cambio, y presenta un cambio en el flujo al interior del reactor, ocasionando que el flujo tenga un comportamiento mayormente de mezcla completa y en parte de flujo pistón.

⁴⁵ Ibid. Pg. 59.

3. DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE LA HIDRODINÁMICA DE LOS REACTORES MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO DE TRAZADORES

Para el desarrollo de esta herramienta, se tuvo en cuenta principalmente la información descrita por Octave Levenspiel en su libro “Tracer technology Modeling the Flow of fluids” en el cual se describe todo el desarrollo matemático que se debe realizar para determinar correctamente el comportamiento de los fluidos dentro de un recipiente en particular a partir de los datos obtenidos experimentalmente en el ensayo de trazadores.

La importancia de este estudio radica en el hecho de que no es correcto realizar suposiciones respecto al comportamiento que puede poseer una unidad de proceso (reactores, intercambiadores de calor, torres de absorción, entre otros) solo por conocer su diseño o configuración, ya que debido a la capacidad que poseen los fluidos como el agua de transportar materia, desconocer el TRH correcto de la unidad puede generar errores en el volumen real utilizado dentro de la misma, y por consiguiente producen un producto incorrecto en sistemas de reacciones múltiples.⁴⁶

Por tal razón, se introdujo el método de trazadores primero para medir el flujo real de fluido a través cualquier recipiente y luego para desarrollar un modelo adecuado para representar este flujo; Estos modelos se utilizan para seguir el flujo de fluido en reactores químicos y otras unidades de proceso ya que es importante conocer la hidrodinámica de estas unidades para tener certeza de que se cumplen los balances de masa.⁴⁷

3.1 DESARROLLO MATEMÁTICO LLEVADO A CABO POR LA HERRAMIENTA

Luego de realizar el ensayo de trazadores y obtener sus datos, se procede a programar la herramienta en Excel que se encargará de realizar los cálculos con base en los modelos descritos por Levenspiel, a partir de los datos obtenidos experimentalmente siguiendo los pasos que se muestran a continuación:

En primer lugar, se debe graficar la curva Pulso - Respuesta utilizando los datos registrados (tiempo en x , Señal / Concentración en Y), dado que el ensayo se realiza con un colorante para alimentos como trazador y que el sensor óptico de barrera se encarga de emitir una variación en la señal desde el momento en el que reconoce la presencia de este a la salida del reactor, la señal (S) emitida por

⁴⁶ LEVENSPIEL, Octave. Tracer technology, fluid mechanics and its applications. 2012. Pg. 5.

⁴⁷ Ibid. Pg. 6.

los sensores de barrera tiene una equivalencia con el valor de concentración (C), es decir se realiza un análisis dimensional. Este análisis no generaría inconsistencias en los cálculos ya que el comportamiento gráfico sería el mismo, pero con unidades de concentración.

Adicionalmente, dependiendo de la configuración del software TELAK la curva resultante puede presentar 2 tipos de concavidades, hacia arriba o hacia abajo. Sin embargo, según Levenspiel⁴⁸ la forma en la cual se deben visualizar los datos para estudiar correctamente la hidrodinámica del reactor es con la concavidad hacia abajo y ajustando los datos sobre el eje x para que al momento de calcular el área bajo la curva los cálculos sean más exactos.

De modo que se programó la herramienta para que luego de agregar los datos del experimento y de importar los datos registrados en el software TELAK, esta sea capaz de ajustar correctamente la gráfica como se mencionó anteriormente para luego proceder a realizar los cálculos correspondientes. Luego, se realiza el cálculo de dos de las variables más importantes para describir las curvas de trazadores, las cuales son:

- La media, \bar{t} , que indica en promedio cuando el trazador abandona el reactor, es decir, cual es el TRH experimental (real).
- La varianza, σ^2 , que indica que tan amplia o extendida es la curva de resultante.

A continuación, se presenta el desarrollo de los cálculos para obtener los resultados del reactor Híbrido.

Antes de realizar el cálculo de la media (\bar{t}), se debe conocer el área bajo la curva de la gráfica Pulso-Respuesta o S Vs t, empleando la **ecuación 4**.

Ecuación 9. Área bajo la curva de la gráfica Pulso-Respuesta

$$A = \int_t^{\infty} S dt$$

Fuente: elaboración propia, basado en LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology modeling de flow of fluids. 2012. Pg. 36

⁴⁸ LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology modeling de flow of fluids. Chapter 1. The tracer Method. 2012. Pg. 3

Luego de obtener el valor del área bajo la curva de toda la gráfica usando la integral es posible calcular la media \bar{t} con la **ecuación 5**, la cual se aplica cuando se tienen datos con intervalos de tiempo iguales.

Ecuación 10. Tiempo medio de retención (Levenspiel).

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tS dt}{\int_0^{\infty} S dt} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

Fuente: elaboración propia, con base en LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology modeling de flow of fluids. 2012. Pg. 36.

A continuación, se procede a realizar el cálculo de la varianza σ^2 y la varianza normalizada σ_{θ}^2 empleando las **ecuaciones 6 y 7** para intervalos de tiempo iguales.

Ecuación 11. Varianza.

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 S dt}{\int_0^{\infty} S dt} - \bar{t}^2 = \frac{(t_i - tm)^2 * C_i \Delta t_i}{C_i \Delta t_i}$$

Fuente: elaboración propia, con base en LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology modeling de flow of fluids. 2012. Pg. 37.

Ecuación 12. Varianza Normalizada.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{(\bar{t})^2 [min]}$$

Fuente: elaboración propia, con base en LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology modeling de flow of fluids. 2012. Pg. 37.

Posteriormente, se realizan los siguientes cálculos para obtener los resultados completos del ensayo de trazadores y realizar el respectivo análisis.

- Tiempo de retención hidráulico teórico (usando el caudal del ensayo).
- Curva E
- Curva F
- Número de tanques en serie.

3.2 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO TEÓRICO

El tiempo de retención teórico se calcula empleando la relación entre el volumen del reactor y el caudal utilizado durante el desarrollo del ensayo de trazadores, el cual debía ser igual o muy cercano al TRH escogido en los parámetros de operación, de este modo, se presenta la **ecuación 13**.

Ecuación 13. Tiempo de retención hidráulico teórico del Reactor híbrido.

$$TRH_{Teórico} = \frac{Vol. reactor (ml)}{Caudal \left(\frac{ml}{min}\right)} = \frac{4040 ml}{5,5 ml/min} = 734,545 min = 12,24h$$

Fuente: elaboración propia, con base en LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology modeling de flow of fluids. 2012. Pg. 7.

3.3 CURVA E

Se realiza un proceso de normalización de la curva S(t), dividiendo cada valor experimental S(t) por el área bajo la curva S(t), y se realiza la gráfica **E(t) Vs t**.

Ecuación 14. Normalización de la curva E.

$$E(t) = \frac{S(t)}{A} = \frac{C_i}{\sum C_i \Delta t}$$

Fuente: Elaboración propia, con base en SANCHEZ, Joany., CARDONA, Santiago., Evaluación del comportamiento Hidráulico de un reactor Aerobio y un reactor Anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeña escala. 2009. Pg. 72.

Se debe medir el tiempo en términos del número de tiempos de residencia medios, es decir, calculamos θ y E_θ con ayuda de la media.

Ecuación 15. Tiempo normalizado.

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}}$$
$$E_\theta = \bar{t} * E(t) = \bar{t} * \frac{S(t)}{A}$$

Fuente: Elaboración propia, con base en LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology modeling de flow of fluids, 2011.

3.4 CURVA F

- Se calcula la integral de F

Ecuación 16. Sumatoria de la integral de F.

$$F = \int_0^{\infty} E_{\theta} d\theta = \sum E_{\theta} * \Delta\theta$$

Fuente: Elaboración propia, con base en LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology modeling de flow of fluids, 2011.

- Se calcula una columna de datos que contenga el acumulado de la integral F (el valor máximo de esta debe ser la unidad), y se realiza la gráfica **F Vs θ** .

3.5 MODELO DE TANQUES EN SERIE

El número de tanques en serie se obtiene despejando la siguiente ecuación, utilizando el valor de la varianza normalizada como denominador de 1. Y el resultado equivale al número de reactores CSTR en serie como mostró en la ecuación 3.

Ecuación 3. Numero de tanques en serie.

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Químicas, Tercera edición 2004. Pg. 259.

4. VALIDACION DE LA HERRAMIENTA ANALITICA CON LOS DATOS EXPERIMENTALES

Para poder validar los resultados obtenidos por la herramienta, se comparan con la plantilla de Excel que llevo a cabo los cálculos en primer lugar, los resultados de la plantilla fueron los que se muestran en la **ilustración 13**:

Ilustración 14. Resultados Plantilla Excel Reactor Híbrido.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Q	5,5											VARIANZA	varianza N
2	V	4040			3655718000	Media			e(i)	0,018954143		1,06176E+12	306464,2576	0,275250504
3	TRH teórico (min)	734,545455			3454550	1055,1783	tm (min)					3464550		REACTORES EN SERIE
4	TRH teórico (h)	12,2424242				17,58631	tm (h)							3,633054198
5														
6	t	Sensor	*-100	C inicial	PARAMETRO	C*dt	E(θ)	t ² *C ² *Dti	(ti-tm)*2*C ² *Dti	C*t	θ	Eθ	F	Sumatoria de F
7	0	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	5	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,00473854	0	0	0
9	10	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,00947707	0	0	0
10	15	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,01421561	0	0	0
11	20	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,01895414	0	0	0
12	25	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,02369268	0	0	0
13	30	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,02843121	0	0	0
14	35	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,03316975	0	0	0
15	40	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,03790829	0	0	0
16	45	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,04264682	0	0	0
17	50	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,04738536	0	0	0
18	55	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,05212389	0	0	0
19	60	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,05686243	0	0	0
20	65	75,3	-7530	0		0	0	0	0	0	0,06160096	0	0	0
21	70	75,2	-7520	10		50	2,88638E-06	3500	485,26814,73	700	0,0663395	0,003045643	1,44319E-05	1,44319E-05

Fuente: elaboración propia.

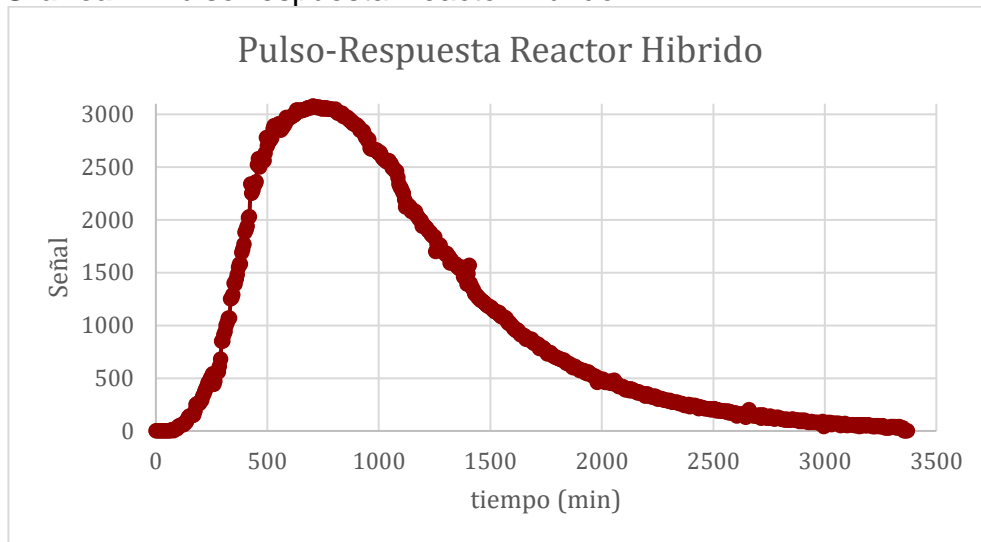
Luego, al ejecutar la herramienta para realizar los cálculos y obtener los parámetros mencionados anteriormente junto con las gráficas, es posible realizar un análisis del tipo de flujo que maneja el reactor observando el comportamiento del gráfico “Pulso-Respuesta” ajustado, los resultados se presentan a continuación.

Tabla 3. Resultados ensayo de trazadores del reactor híbrido

Parámetro	Reactor Híbrido
Caudal (ml/min)	5,5
TRH teórico (h)	12,24
TRH experimental (h)	17,586
Varianza (σ^2)	306464,2575
Varianza Normalizada (σ^2_{θ})	0,2752
No. De tanques en serie (N)	3,63

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2. Pulso-respuesta Reactor híbrido.



Fuente: elaboración propia

Según Levenspiel cuando la **gráfica 2** resultante del ensayo (Pulso-Respuesta) posee ese comportamiento en el cual la concentración aumenta rápidamente y luego comienza a descender en una curva exponencial amplia, significa que posee un flujo combinado entre flujo pistón y mezcla completa, lo cual va de la mano con la configuración del reactor ya que al poseer cambios de diámetro este es capaz de generar remolinos en su interior, promoviendo un mezclado constante y homogéneo a través de este.⁴⁹

Al observar los resultados presentados en la **tabla 3**, se evidencia que el tiempo de retención hidráulico experimental es mayor al tiempo de retención teórico, esto sucede debido a que el trazador presenta dificultades para realizar su paso a través del reactor, lo cual puede estar relacionado con el cambio de materiales que este posee, ya que puede suceder que se presente fricción al realizar el paso de PVC a acrílico, luego PET y por último PVC nuevamente.

La apertura de la curva es determinada por la varianza, que corresponde a un valor de 306464,2575, y por la varianza normalizada (σ^2_{θ}) para el caso de la curva E, que corresponde a un valor de 0,2752.

El caudal se escoge con el fin de tener un TRH teórico de 12h, que esta estandarizado por la UAN para que la materia orgánica se degrade en ese tiempo. Por tal razón, se realiza el ensayo de trazadores para conocer si el caudal empleado permite asegurar que el valor de TRH teórico y experimental sea cercano o igual.

⁴⁹ LEVENSPIEL, Octave. Ingeniería de las reacciones Químicas. Pg. 286.

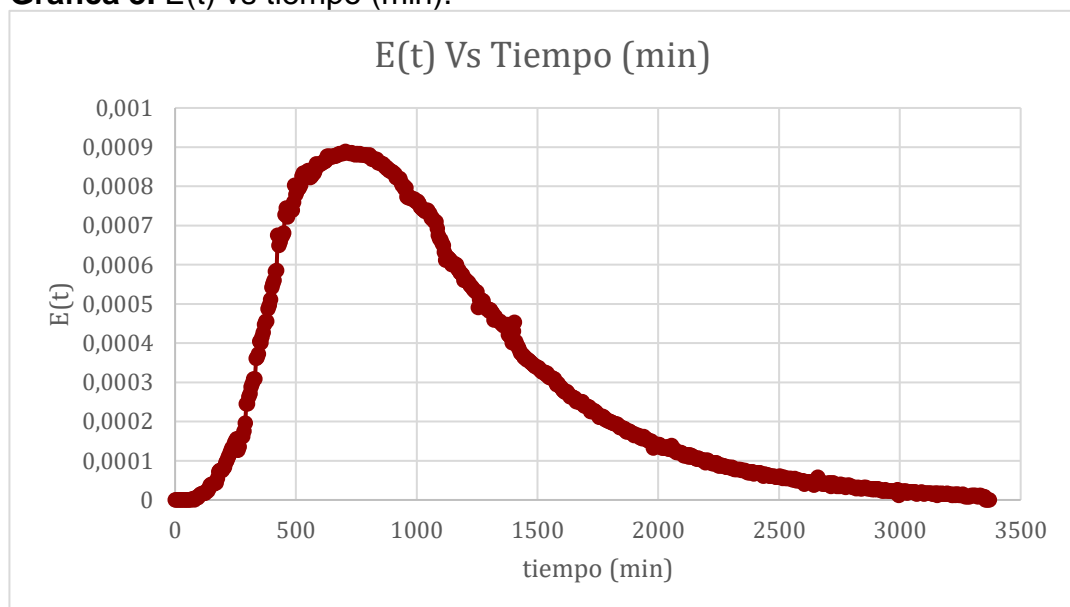
Se debe tener en cuenta que, para este experimento, el volumen del reactor es constante, el caudal se toma como una variable independiente y el TRH experimental es una variable dependiente o respuesta, junto con el modelo de reactores en serie, las varianzas y las gráficas.

Además de la presencia de las espumas de polietileno de baja densidad, las cuales a pesar de no absorber el colorante también pueden aumentar el tiempo del recorrido del trazador, adicionalmente se encontró que el comportamiento del reactor híbrido equivale a 3,63 reactores CSTR en serie, valor que puede aproximarse a 4.

Estos resultados son favorables ya que dentro de los procesos de digestión anaerobia, uno de los factores más relevantes es el tiempo de contacto entre la materia orgánica que será degradada y los microorganismos con los que se inocula el reactor, de modo que encontrar la manera de aumentar el tiempo de retención es primordial para obtener una mayor producción de Biogás, o el producto de interés, esto se ve claramente en los resultados ya que el tiempo de retención experimental presenta un aumento de un poco más de 5 horas respecto al valor teórico.

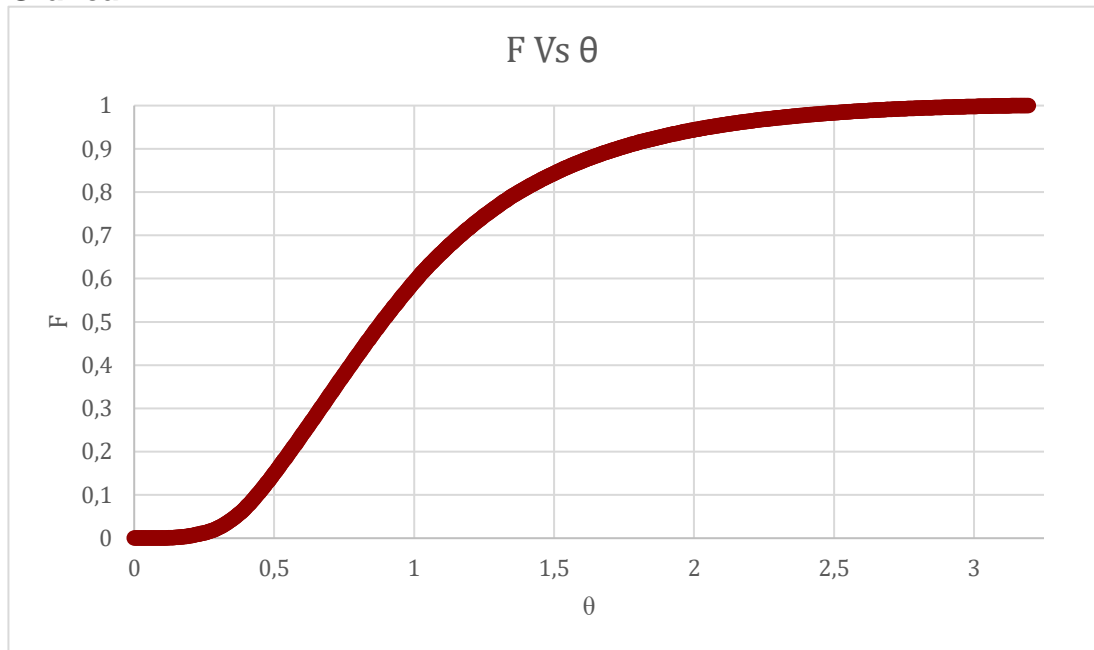
A continuación, se presentan las **gráficas 3 y 4**.

Gráfica 3. E(t) vs tiempo (min).



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4. F vs θ .



Fuente: elaboración propia

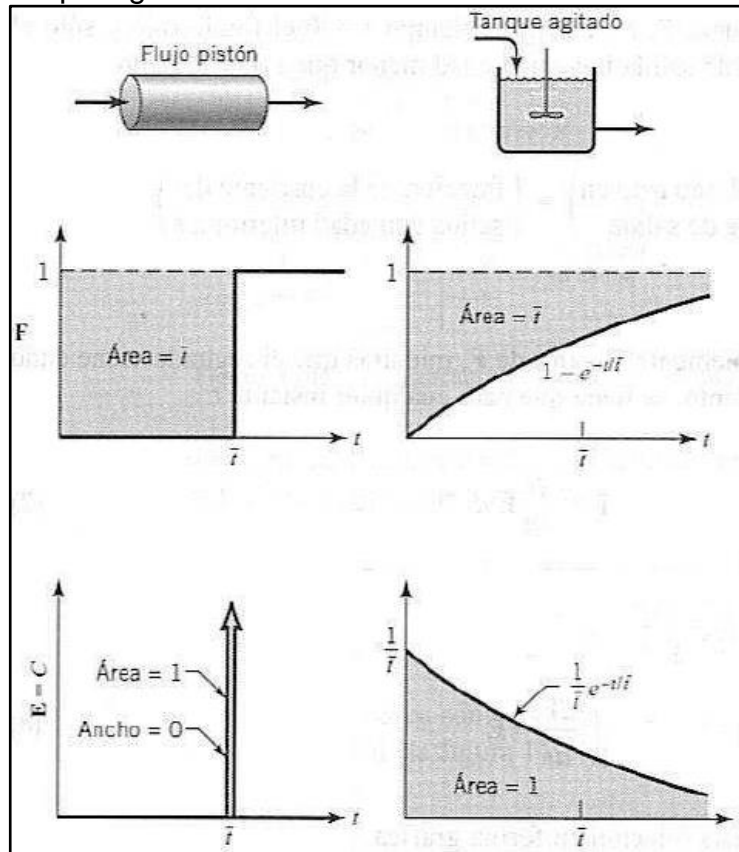
La **gráfica 3** de “E(t) vs tiempo” representa la distribución de los tiempos de residencia que posee el fluido al interior del reactor híbrido, quien actúa como un recipiente cerrado que cumple con la restricción de la curva E, en donde el fluido solamente entra y sale una vez del recipiente, de modo que no habría posibilidad de que existiera flujo o difusión en la dirección contraria al flujo de entrada o salida del reactor. Los valores de E(t) poseen unidades de tiempo⁻¹ (min⁻¹). Y el área bajo la curva de esta gráfica equivale a 1.⁵⁰

Por otro lado, la **gráfica 4** “F vs θ ” representa la forma adimensional de la gráfica Pulso-Respuesta en donde se observa como la medida de la concentración/Señal varía desde cero hasta 1.

El comportamiento de las gráficas 3 y 4 es equivalente al esperado según Levenspiel para un reactor con un comportamiento de flujo tipo Mezcla completa o tanque agitado, tal cual como se puede ver en la **ilustración 14**.

⁵⁰ Ibid. pg. 260.

Ilustración 15. Curvas F y E para Flujo pistón y tanque agitado.



Fuente: LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Químicas, Tercera edición 2004. Pg. 266.

4.1 VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA CON OTROS ENSAYOS DE TRAZADORES

A continuación, se presenta la validación con la herramienta de los datos experimentales obtenidos por el autor Sergio Pérez quien en su tesis de pregrado realizó el ensayo para 2 reactores tipo RME del mismo volumen (4120 ml), y para los cuales obtuvo los resultados presentes en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Resultados Ensayo de trazadores Biorreactor 1 y 2 del autor Sergio Pérez.

Parámetro	Reactor RME 1	Reactor RME 2
Caudal (ml/min)	5,5	6,5
TRH teórico (h)	12,48	10,56
TRH experimental (h)	11,3	11,29
Varianza (σ^2)	287950,996	274697,8372
Varianza Normalizada (σ^2_{θ})	0,62672	0,59866
No. De tanques en serie (N)	1,6	1,7

Fuente: elaboración propia con base en, PÉREZ, Sergio., Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR). 2020. Pg. 64, 99,94.

En seguida se presenta la validación de los datos del autor Sergio Pérez con la Herramienta para el reactor RME 1 siguiendo los pasos del manual que se encuentra en el **ANEXO A.** comenzando desde la **ilustración 16** y terminando en la **ilustración 21** se muestra el procedimiento del uso de la herramienta para validar los datos experimentales del autor.

Ilustración 16. Paso 1- Se agregan los datos experimentales de R1.

The screenshot shows a software window titled "Datos Experimentales" with a close button (X) in the top right corner. The window contains four input fields with labels and values:

- Caudal (ml/min)*: 5,5
- Volumen del Reactor (ml)*: 4120
- Δt (min): 2
- Pulso realizado en tiempo (min)*: 14

At the bottom of the window, there are two buttons: "Aceptar" and "Cerrar".

Fuente: elaboración propia

Ilustración 17. Paso 2 - Copiamos la ruta de acceso y el nombre del archivo.



Fuente: elaboración propia

Ilustración 18. Verificación de datos iniciales correctamente cargados - R1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	DATOS EXPERIMENTALES				t min	0							
2					t max	2576							
3	Caudal (ml/min)	5,5			Smin	24,8							
4	Volumen del reactor (ml)	4120			Smax	284,8							
5	TRH - Teórico (min)	749,090909						ult. Fila	valor ult. Fila				
6	Dt (min)	5			100	0 RESTAR							
7	Pulso realizado en t (min)	14			-100	0 SUMAR							
8					0	Verificación C inicial							
9					0	Verificación C inicial							
			Según Tipo de concavidad										
10	tiempo	Señal	+100 (Concava abajo)	+100 (concava Arriba)	C inicial	PARÁMETRO	C*Dt	E(t)	ti*C1*Dti	(6-tn)*2*C1*Dti	C*t	θ	Eθ
11	0	24,8											
12	2	24,8											
13	4	24,8											
14	6	24,8											
15	8	24,8											
16	10	24,8											
17	12	24,8											
18	14	24,8											
19	16	24,8											
20	18	24,8											
21	20	24,8											
22	22	24,8											
23	24	24,8											
24	26	24,8											
25	28	44,8											
26	30	64,8											

Fuente: elaboración propia

Luego de cargar los datos correctamente se ejecuta el tercer paso donde en primer lugar, carga una ventana que en cuyo lado izquierdo se visualiza la gráfica de los datos que se acaban de importar y por último se realizan los cálculos respectivos dependiendo de la concavidad que posean estos datos (la concavidad la selecciona el usuario) y se obtienen los resultados finales en un tiempo muy corto, menor a 1min: 30s.

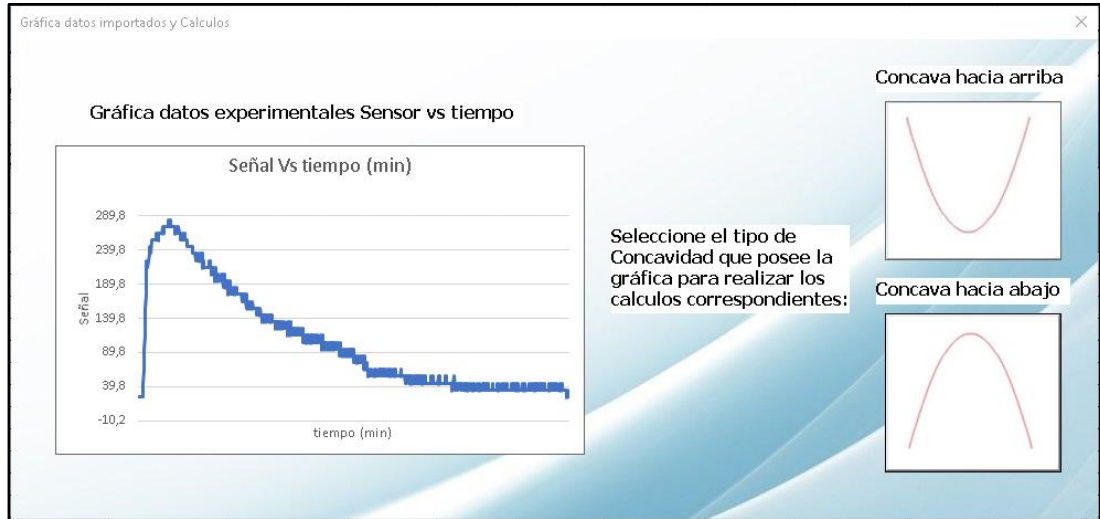
Ilustración 19. Paso 3 - Cálculos Y Resultados R1.

DATOS EXPERIMENTALES		Según Tipo de concavidad		PARAMETROS		E(t)		ti*Ci*Dti		(ti-tm)^2*Ci*Dti		C*t		EΘ		F	
1	t min			C inicial	PARAMETROS	C*Dt	E(t)	ti*Ci*Dti	(ti-tm)^2*Ci*Dti	C*t	Θ	EΘ	F	Su			
2	t max																
3	Caudal (ml/min)	5,5															
4	Volumen del reactor (ml)	4120															
5	TRH - Teórico (min)	749,090909															
6	Dt (min)	2															
7	Pulso realizado en t (min)	14															
8																	
9																	
10	tiempo	Señal															
11	0	24,8	2480														
12	2	24,8	2480				0,0	0	0	0	0,00295058	0	0				
13	4	24,8	2480				0	0	0	0	0,00590116	0	0				
14	6	24,8	2480				0	0	0	0	0,00885175	0	0				
15	8	24,8	2480				0	0	0	0	0,01180233	0	0				
16	10	24,8	2480				0	0	0	0	0,01475291	0	0				
17	12	24,8	2480				0	0	0	0	0,01770349	0	0				
18	14	24,8	2480				0	0	0	0	0,02065408	0	0				
19	16	24,8	2480				0	0	0	0	0,02360466	0	0				
20	18	24,8	2480				0	0	0	0	0,02655524	0	0				
21	20	24,8	2480				0	0	0	0	0,02950582	0	0				
22	22	24,8	2480				0	0	0	0	0,03245641	0	0				
23	24	24,8	2480				0	0	0	0	0,03540699	0	0				
24	26	24,8	2480				0	0	0	0	0,03835757	0	0				
25	28	44,8	4480	2000		4000	9,46342E-05	112000	1689128115	56000	0,04130815	0,06414614	0,00018927				
26	30	64,8	6480	4000		8000	0,000189268	240000	3357493596	120000	0,04425873	0,12829229	0,00037854				

9																	
10																	
11																	
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	

Fuente: elaboración propia

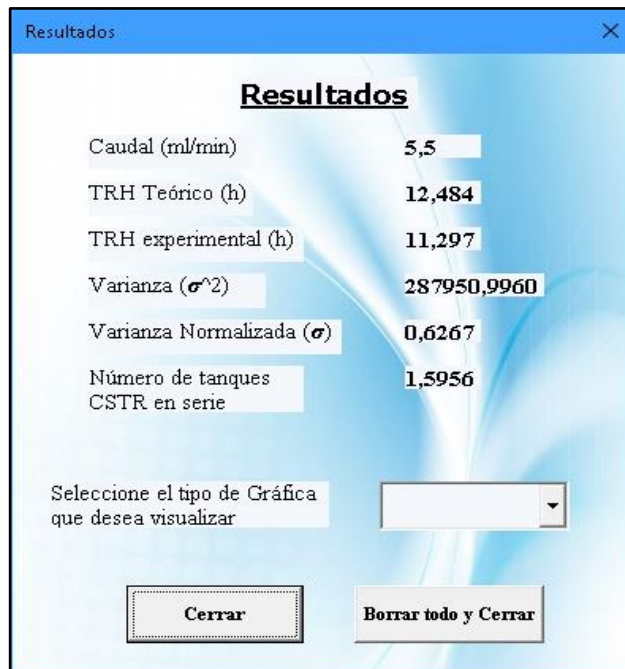
Ilustración 20. Gráfica de resultados R1.



Fuente: elaboración propia

Finalmente, en la **ilustración 20** se muestra el paso 4, que abre una ventana que presenta los resultados más relevantes de todos los calculos realizados, además de dar la opción de visualizar las gráficas obtenidas a partir de los calculos realizados.

Ilustración 21. Paso 4 – Resultados y Gráficas R1.



Fuente: elaboración propia

Del mismo modo, como se realizó el procedimiento para el reactor R1, se siguen exactamente los mismos pasos para el **reactor 2 (R2)** y se obtienen los resultados mostrados en la **ilustración 21**:

Ilustración 22. Paso 4 - Resultados y Gráficas R2.

Resultados	
Caudal (ml/min)	6,5
TRH Teórico (h)	10,564
TRH experimental (h)	11,289
Varianza (σ^2)	274697,8372
Varianza Normalizada (σ)	0,5986
Número de tanques CSTR en serie	1,6703

Seleccione el tipo de Gráfica que desea visualizar

Fuente: elaboración propia

Estos resultados comprueban que los calculos realizados por el autor Sergio Pérez son iguales a los encontrados por la herramienta, lo cual quiere decir que la herramienta funciona correctamente y cumple a cabalidad con su objetivo de realizar los calculos correspondientes en un tiempo muy corto.

5. CONCLUSIONES

- El estudio del comportamiento Hidrodinámico que posee el reactor Híbrido, hallado a partir del ensayo de trazadores demostró que el reactor posee un **flujo mezclado entre flujo pistón y mezcla completa**, además de hallar el tiempo de retención hidráulico real cuando se utiliza un caudal de 5,5 ml/min, el cual tuvo un valor de 17,586 horas, superando al tiempo de retención teórico por un poco más de 5 horas, esto es debido a que el trazador tiene dificultad para fluir al interior del reactor lo cual puede ser causado por la fricción creada entre el cambio de materiales del mismo (Acrílico, PET, PVC) junto con las espumas de polietileno de baja densidad. Adicionalmente, se obtiene que el reactor Híbrido posee un comportamiento que equivale a 3,63 reactores CSTR en serie del mismo volumen, es posible decir que los cambios de diámetro que posee el reactor cumplen su función de generar un mezclado constante y homogéneo durante toda su operación.
- La herramienta creada para el análisis de la Hidrodinámica de reactores cumple perfectamente con su función, realizando los cálculos correspondientes descritos por Levenspiel en un tiempo menor a los 2 minutos: 30 segundos, siendo capaz de generar las distintas gráficas (“Pulso-Respuesta”, “E(t) vs t” y “F vs θ ”) con base en los cálculos realizados y de realizar el cálculo del modelo de los reactores CSTR en serie.
- La validación de la herramienta se realizó introduciendo los datos experimentales obtenidos del biorreactor híbrido y comparando estos con los obtenidos experimentalmente, adicionalmente, se validó con los datos experimentales del ensayo de trazadores del autor Sergio Pérez, quien utilizó dos biorreactores tipo RME del mismo volumen, pero con distintos caudales. Al comparar ambos resultados experimentales, con los obtenidos con la herramienta, se comprobó que dieron exactamente igual, esto debido a que la herramienta sigue los procedimientos matemáticos descritos por Levenspiel, al igual que los autores que realicen el mismo ensayo.

6. RECOMENDACIONES

- Se podrían evaluar más resultados experimentales para comprobar la efectividad de la herramienta.
- Se podría de repetir el ensayo de trazadores manejando otros valores de caudal para evaluar si existe alguna modificación en el tipo de flujo, o en los datos calculados de forma manual y con la herramienta.
- Se debe leer el manual de la Herramienta que se presenta en el ANEXO A.

BIBLIOGRAFÍA

ATKINS, M.D Velocity Field Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV). 2016

DOMINGO, Agustín. Apuntes de Mecánica de fluidos. Universidad Politécnica de Madrid. Pg. 5.

GIÁCOMAN, Germán. Análisis de la Hidrodinámica de un reactor en Flujo pistón. 2003

GOLLIN, Devis. Performance of PIV and PTV for granular flow measurement. 2017

HALL, Eric., Non-intrusive Estimation of Active Volume in anaerobic reactors. 1985.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

LETTINGA, A. et al. Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment, Especially for Anaerobic Treatment

LEVENSPIEL, Octave. Tracer Technology Modeling the flow of fluids. New York: R. Moreau, Madylan. 2012.

LEVENSPIEL, Octave., Ingeniería de las reacciones Químicas, Tercera edición 2004.

LOPEZ, I., UASB reactor hydrodynamics: residence time distribution and proposed modeling tools. 2010.

LOPEZ,I., BORZACCONI, L. Introducción al diseño de reactores. 2009. Pg. 11.

M. DORAN, Pauline. Principios de ingeniería de Bioprocesos (segunda edición), chapter 7 fluid 65ran.2013.

MIETZNER, Michael. Patente No. US2017/0369828 A1. 2017.

MIRANDA, Paulo., Avaliação da biometanização do hidrolisado hemicelulósico obtido pela auto-hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas anaeróbios de duplo estágio e um estágio na presença de carvão ativado em pó. Tesis de Posgrado. Universidad Federal de Ouro Preto. 2018.

OTALORA TAPIERO, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de Pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018.

OYEBBILE, Benjamin., AKDOGAN, Guven. Hydrodynamic Characterization of Physicochemical Process in Stirred Tanks and Agglomeration Reactors. 2018.

PÉREZ, Sergio., Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR). 2020.

SANCHEZ, Joany., CARDONA, Santiago., Evaluación del comportamiento Hidráulico de un reactor Aerobio y un reactor Anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeña escala. Revista: Avances en Recursos Hidráulicos No.20. Universidad Nacional de Colombia. 2009.

STUTTER, MI., DEEKS, LK, Transport conservative and reactive tracers through a naturally structured upland podzol field lysimeter. 2005.

ANEXOS

ANEXO A

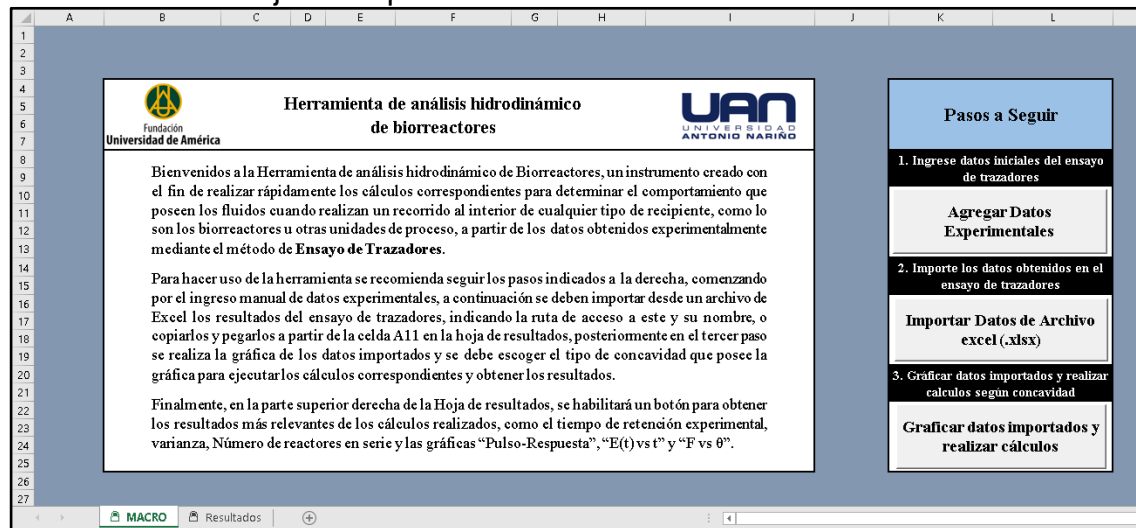
INTERFAZ Y MANUAL DE LA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE LA HIDRODINÁMICA DE REACTORES

Inicialmente, es importante tener en cuenta que:

- La configuración de la Herramienta utiliza “,” comas para decimales, y “.” Puntos para miles.
- La herramienta realiza sus cálculos iniciales a partir de las columnas de tiempo y Señal/Concentración.

Al abrir la Herramienta se encontrará en primer lugar con la hoja principal llamada “**MACRO**”, en esta encontrará a la izquierda una breve descripción de la Herramienta junto con una resumida forma de usarla, y a la derecha encontrará 3 de los 4 pasos a seguir (junto a sus respectivos botones) enumerados claramente para hacer el correcto uso de esta. El procedimiento para hacer uso de la herramienta se muestra desde la **Ilustración 22** hasta la **ilustración 32**.

Ilustración 23. Hoja Principal de la Herramienta



Fuente: elaboración propia

Si antes de comenzar a seguir los pasos desea visualizar la pestaña de resultados encontrará la siguiente estructura sin datos, junto con el 4 paso y su botón que presentará los resultados calculados.

Ilustración 24. Hoja Resultados sin datos.

The image shows an Excel spreadsheet with the following structure:

- Columns:** A-O. Rows 1-9 contain input fields for experimental data.
- Row 10:** Header for the data table with columns: t, Sensor, C (with concavity options), C Inicial, PARAME TRO, C*Dt, E(t), $t_i \cdot C_i \cdot Dt_i$, $(t_i - t_m)^2 \cdot C_i \cdot Dt_i$, C*t, θ , E θ , F, Sumatoria de F.
- Buttons:** "4. Ver resultados y gráficos" and "Resultados".
- Macro Window:** A secondary window titled "Resultados" containing the following calculations:
 - Suma C*Dt
 - Suma E(t)
 - Suma $t_i \cdot C_i \cdot Dt_i$
 - $t_m = (t_i \cdot C_i \cdot Dt_i / C \cdot Dt)$
 - Suma C inicial
 - Suma C*t
 - Suma $(t_i - t_m)^2 \cdot C_i \cdot Dt_i$
 - Varianza = $(t_i - t_m)^2 \cdot C_i \cdot Dt_i / CDt$
 - Varianza N = Varianza / t_m^2
 - Número de Reactores en Serie 1 = $t_m^2 / \text{Varianza}$
 - Número de Reactores en Serie 2 = $1 / \text{Varianza Normalizada}$

Fuente: elaboración propia

Al realizar clic sobre el **primer botón** de la hoja principal, aparecerá la siguiente ventana que se debe diligenciar con los parámetros bajo los cuales se realizó el ensayo de trazadores, se debe tener en cuenta que “ **Δt (min)**” se refiere al intervalo de tiempo entre cada toma de datos (es decir, cada cuanto tiempo los sensores registraron información).

Ilustración 25. Ventana Paso 1 – Registro de datos experimentales.

Variable	Estado Inicial	Estado Final
Caudal (ml/min)		5,5
Volumen del Reactor (ml)		4040
Δt (min)		5
Pulso realizado en tiempo (min)		20

Fuente: elaboración propia

Luego de diligenciar los datos experimentales y hacer clic sobre el botón **Aceptar**, estos datos son almacenados en la hoja de “**Resultados**”, en el segundo paso (botón 2) se debe colocar la ruta de acceso al archivo junto con el nombre para que la herramienta ubique y pueda importar los datos desde el otro archivo de Excel que contenga los datos, sin embargo, también es posible copiar y pegar los datos directamente sobre la hoja de resultados

Ilustración 26. Ventana Paso 2 – Ruta de Acceso y nombre de archivo de Excel.

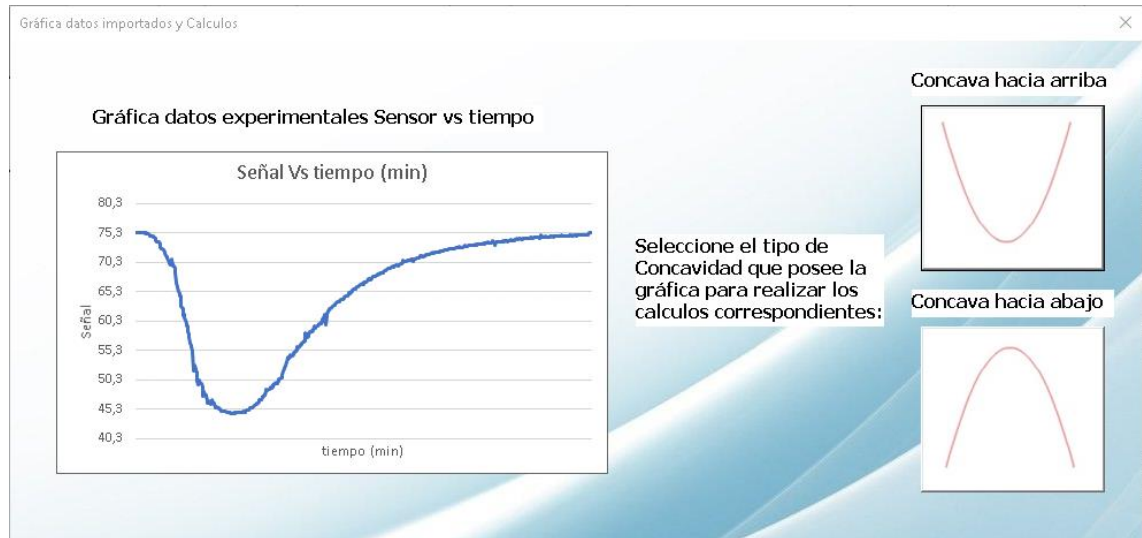
Variable	Estado Inicial	Estado Final
Ruta de Acceso al archivo de excel		C:\Users\Jul\Deskto\Tesis
Nombre del archivo de excel		Datos ensayo Trazadores

Fuente: elaboración propia

Nota: El archivo de Excel que contenga los datos a importar debe poseer la información a partir de la Celda **A1** del archivo, con el respectivo **título que identifique cada columna** (tiempo y Señal/sensor/concentración) como se muestra a continuación.

que ejecuta la herramienta, **finalmente se visualizará correctamente la siguiente ventana**, que le permitirá al usuario seleccionar el tipo de concavidad que poseen los datos importados para realizar los calculos correspondientes. Al seleccionar el tipo de concavidad, la herramienta puede tardar alrededor de **35 segundos En presentar los resultados finales.**

Ilustración 29. Ventana Paso 3 – Gráfica datos importados y opciones de concavidad.



Fuente: elaboración propia

Ilustración 30. Resultados cálculos iniciales parte 1.

DATOS EXPERIMENTALES		Segun Tipo de concavidad		C inicial	PARAMETRO	C*Dt	E(t)	t ² *C ² *Dt ³	(t-tm) ² *C ² *Dt ³	C*t	Θ	EΘ	F	Su
t	Sensor	+100 (Concava abajo)	+100 (concava Arriba)											
11	0	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0	0	0	
12	5	75,3	-7.530,00	0		0	0,0	0	0	0	0,00473854	0	0	
13	10	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,00947707	0	0	
14	15	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,01421561	0	0	
15	20	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,01895414	0	0	
16	25	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,02369268	0	0	
17	30	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,02843121	0	0	
18	35	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,03316975	0	0	
19	40	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,03790829	0	0	
20	45	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,04264682	0	0	
21	50	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,04738536	0	0	
22	55	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,05212389	0	0	
23	60	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,05686243	0	0	
24	65	75,3	-7.530,00	0		0	0	0	0	0	0,06160096	0	0	
25	70	75,2	-7.520,00	10		50	2,88638E-06	3500	48528814,73	700	0,0663395	0,00304564	1,4432E-05	
26	75	75,2	-7.520,00	10		50	2,88638E-06	3750	48037475,58	750	0,07107803	0,00304564	1,4432E-05	

Fuente: elaboración propia

Ilustración 31. Resultados cálculos iniciales parte 2.

	Q	R	S	T	U
9					
10			Suma C * Dt	3464550	
11					
12			Suma E(t)	0,2	
13					
14			Suma ti * Ci * Dt	3655718000	
15					
16			$tm=(ti * Ci * Dt / C * Dt)$	1055,178306	
17					
18			Suma C inicial	692910	
19					
20			Suma C * t	731143600	
21					
22			Suma (ti - tm) ^ 2 * Ci * Dt	1,06176E+12	
23					
24					
25			Varianza = (ti - tm) ^ 2 * Ci * Dt / CDt	306464,2576	
26					
27					
28			Varianza N = Varianza / tm ^ 2	0,275250504	
29					
30					
31			Número de Reactores en Serie 1 = tm ^ 2 / Varianza	3,6330542	
32					
33			Número de Reactores en Serie 2 = 1 / Varianza Normalizada	3,6330542	
34					

Fuente: elaboración propia

Finalmente, al realizar el cuarto paso haciendo clic sobre el botón resultados, se muestra la siguiente ventana que contiene todos los resultados relevantes calculados anteriormente, y que me presenta las gráficas que desee visualizar una por una, la ventana y los gráficos se presentan a continuación.

Ilustración 32. Ventana Paso 4 - Resultados finales

Resultados

Caudal (ml/min) 5,5

TRH Teórico (h) 12,242

TRH experimental (h) 17,586

Varianza (σ^2) 306464,2575

Varianza Normalizada (σ) 0,2752

Número de tanques CSTR en serie 3,6330

Seleccione el tipo de Gráfica que desea visualizar

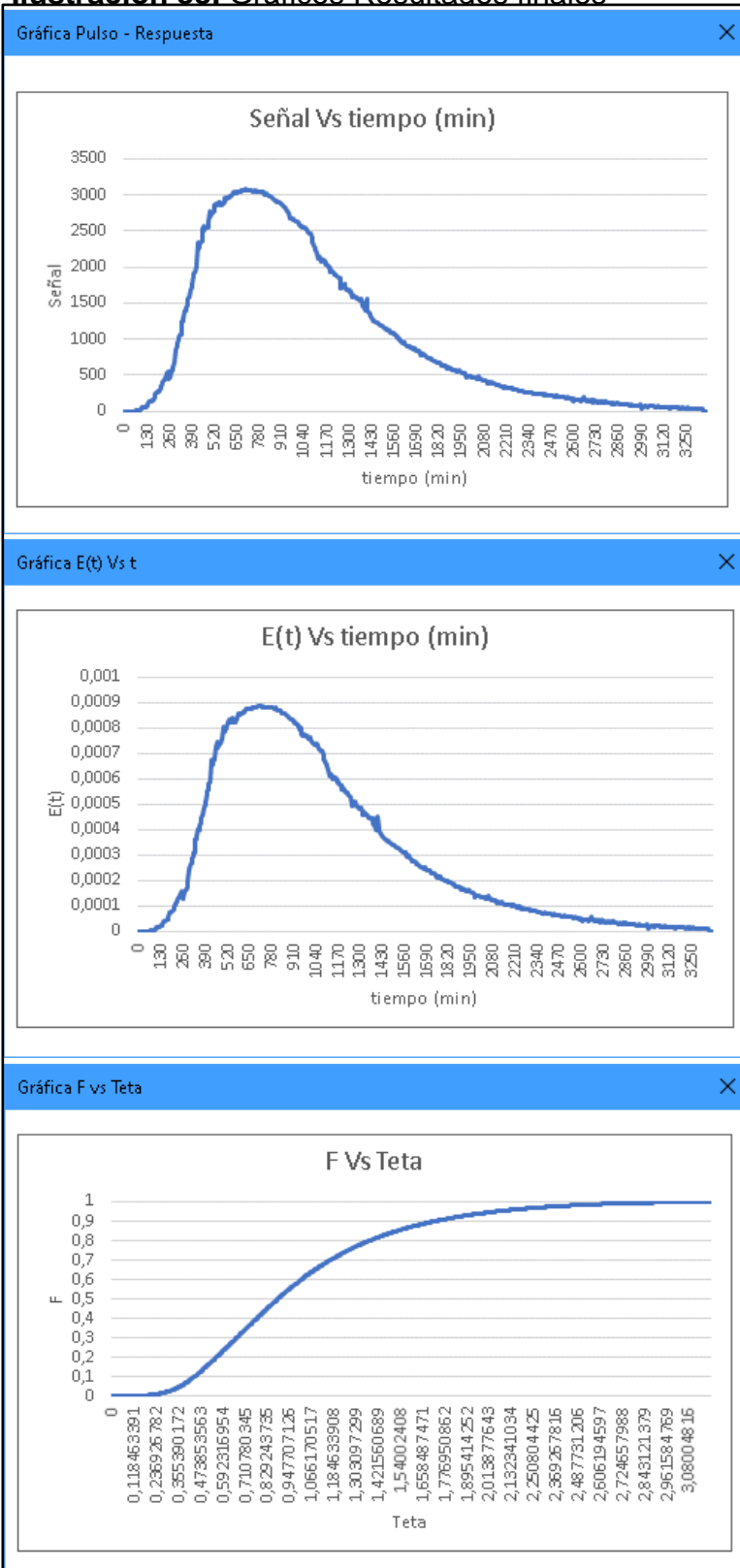
Cerrar

- E(t) Vs t
- F Vs Teta

Borrar todo y Cerrar

Fuente: elaboración propia

Ilustración 33. Gráficos Resultados finales



Fuente: elaboración propia

ANEXO B

CÓDIGO UTILIZADO EN LA HERRAMIENTA

Inicialmente, se programa el botón del primer paso expuesto en el manual, en el momento de hacer click sobre este, aparece como ventana emergente la **ilustración 25**, en la cual se registran los datos experimentales.

Figura 1. Código utilizado en el UserForm1.

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
  
Sheets("Resultados").Unprotect Password:="0987654321"  
  
Hoja2.Cells(3, 2) = TextBox1.Text  
Hoja2.Cells(4, 2) = TextBox2.Text  
Hoja2.Cells(6, 2) = TextBox3.Text  
Hoja2.Cells(7, 2) = TextBox4.Text  
  
If TextBox1.Text = "" Then  
Hoja2.Cells(5, 2) = ""  
Hoja2.Cells(3, 2) = ""  
Hoja2.Cells(6, 2) = ""  
Hoja2.Cells(7, 2) = ""  
Else: Hoja2.Cells(5, 2) = TextBox2.Text / TextBox1.Text  
  
End If  
  
Unload Me  
Sheets("Resultados").Protect Password:="0987654321"  
  
Exit Sub  
  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton2_Click()  
Unload Me  
End Sub
```

Fuente: elaboración propia

A continuación, se realiza la programación del botón del segundo paso expuesto en el manual, en el momento de hacer click sobre este, aparece como ventana emergente la **ilustración 26**, en la cual se introducen los datos de ruta de Acceso y nombre de archivo de Excel.

Figura 2. Código utilizado en el UserForm2.

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Dim wbLibroOrigen As Workbook  
Dim wsHojaOrigen As Worksheet  
Dim wbLibroDestino As Workbook  
Dim wsHojaDestino As Worksheet  
Dim ruta As String  
'ruta = "C:\Users\sergi\Desktop\Tesis Ebby J\Prueba.xlsx"  
ruta = TextBox1.Text + "\" + TextBox2.Text  
  
MsgBox ruta  
  
'Datos Destino  
Set wbLibroDestino = Workbooks(ThisWorkbook.Name)  
Set wsHojaDestino =  
wbLibroDestino.Worksheets("Resultados")  
  
'Datos Origen  
Set wbLibroOrigen = Workbooks.Open(ruta)  
Set wsHojaOrigen = wbLibroOrigen.Worksheets("Hoja1")  
  
uFila = wsHojaOrigen.Range("A" & Rows.Count).End(xlUp).Row  
'MsgBox uFila  
  
wsHojaOrigen.Range("A1:B" & uFila).Copy  
Destination:=wsHojaDestino.Range("A10")  
Workbooks(wbLibroOrigen.Name).Close Savechanges:=False  
Unload Me  
  
Exit Sub  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton2_Click()  
Unload Me  
End Sub
```

Fuente: elaboración propia

Luego, se procede con la programación de la ventana emergente que aparece después de importar los datos experimentales correspondientes a la **ilustración 29**, presentando la gráfica a la izquierda de esta ventana, acto seguido, habilita automáticamente el botón correspondiente según la concavidad que se presenta en la gráfica.

Figura 3. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 1.

```
Sub CommandButton1_Click()  
Dim n As Integer  
For n = 1 To 2  
Call Operaciones  
Application.ScreenUpdating = True  
Next n  
  
Sheets("Resultados").Protect Password:="0987654321"  
  
MsgBox ("Los calculos se realizaron correctamente"),  
vbInformation, "AVISO"  
MsgBox "Resultados COMPLETOS"  
End Sub  


---

  
Sub Operaciones()  
Application.ScreenUpdating = False  
On Error Resume Next  
DisplayAlerts = False  
  
Dim F_acum As Long  
Dim i As Integer  
Dim uf As String  
Dim fila As Integer  
i = 11  
fila = 11  
pf = 11  
F_acum = 0  
uf = Sheets("Resultados").Range("B" &  
Rows.Count).End(xlUp).Row  
  
While Cells(fila, "B") <> Empty  
'Reorganizar la gráfica y ajustarla a Cero  
'Multiplico los datos de Señal * -100  
Cells(fila, "D") =  
Application.WorksheetFunction.Product(Cells(fila, "B"),  
Cells((7), 5))  
'Suma para hallar C inicial  
Cells((11), 5) = Cells((11), 4) - Cells((7), 6)  
Cells(fila, "E") = Cells(fila, "D") + (Cells((7), 6) * -1)  
'Cells(fila, "E") =  
(Application.WorksheetFunction.Product(Cells(fila, "B"),  
Cells((7), 5))) + (Cells((7), 6) * -1)
```

Fuente: elaboración propia

Figura 4. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 2.

```
'Sumatoria C inicial
Cells((18), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("E" & pf & ":E" &
uf))
'C*dt
Cells((11), 7) = Cells((11), 1) * Cells((11), 5)
Cells(fila, "G") = Cells(fila, "E") * (Cells((6), 2))
'Sumatoria C*dt
Cells((10), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("G" & pf & ":G" &
uf))

'E(t)
Cells((11), 8) = Cells((11), 5) / Cells((10), 19)
Cells(fila, "H") = Cells(fila, "E") / Cells((10), 19)
'Sumatoria E(t)
Cells((12), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("H" & pf & ":H" &
uf))

'ti*Ci*Dti
Cells((11), 9) = Cells((11), 1) * Cells((11), 5)
Cells(fila, "I") = Cells(fila, "E") * Cells(fila, "A") *
(Cells((6), 2))

'Sumatoria ti*Ci*Dti
Cells((14), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("I" & pf & ":I" &
uf))

'tm=(ti*Ci*Dti/C*dt)
Cells((16), 19) = Cells((14), 19) / Cells((10), 19)

'(ti-tm)^2*Ci*Dti
Cells((11), 10) = (Cells((11), 1) - (Cells((16), 19))) ^ 2
* (Cells((11), 7)) * (Cells((11), 1))
Cells(fila, "J") = (((Cells(fila, "A")) - Cells((16), 19))
^ 2) * Cells(fila, "E") * Cells((6), 2)

'Sumatoria (ti-tm)^2*Ci*Dti
Cells((22), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("J" & pf & ":J" &
uf))
```

Fuente: elaboración propia

Figura 5. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 3.

```
'c*t
Cells(fila, "K") = Cells(fila, "A") * Cells(fila, "E")

'Sumatoria C*t
Cells((20), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("K" & pf & ":K" &
uf))

'TETA = t/tm
Cells(fila, "L") = Cells(fila, "A") / Cells((16), 19)

'E(TETA) = E(t)*tm
Cells(fila, "M") = Cells(fila, "H") * Cells((16), 19)

'F = TETA* E(TETA)
Cells((11), 14) = Cells((11), 13) * Cells((11), 12)
Cells(fila, "N") = Cells(fila, "M") * (Cells(fila, "L") -
Cells(fila - 1, "L"))

'VARIANZA = (ti-tm)^2*Ci*Dti/C*dt
Cells((25), 20) = Cells((22), 19) / Cells((10), 19)

'VARIANZA NORMALIZADA = VARIANZA/tm^2
Cells((28), 20) = Cells((25), 20) / (Cells((16), 19) ^ 2)

'NÚMERO DE REACTORES EN SERIE 1 = (tm)^2/Varianza
Cells((31), 21) = (Cells((16), 19) ^ 2) / Cells((25), 20)

'NÚMERO DE REACTORES EN SERIE 2 = 1/Varianza Normalizada
Cells((33), 21) = 1 / Cells((28), 20)

'COLUMNA SUMATORIA DE F
Cells((11), 15) = 0
Cells(i, "O") = Cells(i, "N") + Cells(fila - 1, "O")
Cells(fila, "O") = Cells(fila, "N") + Cells(fila - 1, "O")
i = i + 1
fila = fila + 1
Cells((11), 15) = 0
Wend
'Range("D:D").NumberFormat = "#,##0.00"

DisplayAlerts = True
Application.ScreenUpdating = True
```

Fuente: elaboración propia

Figura 6. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 4.

```
'MsgBox ("Los calculos se realizaron correctamente"),  
vbInformation, "AVISO"  
  
Unload Me  
Exit Sub  
End Sub  


---

  
Private Sub CommandButton2_Click()  
Dim n As Integer  
For n = 1 To 2  
Call Operaciones2  
Application.ScreenUpdating = True  
Next n  
  
Sheets("Resultados").Protect Password:="0987654321"  
  
MsgBox ("Los calculos se realizaron correctamente"),  
vbInformation, "AVISO"  
MsgBox "Resultados COMPLETOS"  
End Sub  


---

  
Sub Operaciones2()  
Application.ScreenUpdating = False  
On Error Resume Next  
DisplayAlerts = False  
  
Dim F_acum As Long  
Dim uf As String  
Dim fila As Integer  
Dim i As Integer  
i = 11  
fila = 11  
pf = 11  
F_acum = 0  
uf = Sheets("Resultados").Range("B" &  
Rows.Count).End(xlUp).Row  
  
While Cells(fila, "B") <> Empty  
'Reorganizar la gráfica y ajustarla a Cero
```

Fuente: elaboración propia

Figura 7. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 5.

```
'Multiplico los datos de Señal * 100
Cells(fila, "C") =
Application.WorksheetFunction.Product(Cells(fila, "B"),
Cells((6), 5))

'Resta para hallar C inicial
Cells(fila, "E") = Cells(fila, "C") - (Cells((6), 6))

'Sumatoria C inicial
Cells((18), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("E" & pf & ":E" &
uf))

'C*dt
Cells((11), 7) = Cells((11), 1) * Cells((11), 5)
Cells(fila, "G") = Cells(fila, "E") * (Cells((6), 2))

'Sumatoria C*dt
Cells((10), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("G" & pf & ":G" &
uf))

'E(t)
Cells((11), 8) = Cells((11), 5) / Cells((10), 19)
Cells(fila, "H") = Cells(fila, "E") / Cells((10), 19)

'Sumatoria E(t)
Cells((12), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("H" & pf & ":H" &
uf))

'ti*Ci*Dti
Cells((11), 9) = Cells((11), 1) * Cells((11), 5)
Cells(fila, "I") = Cells(fila, "E") * Cells(fila, "A") *
(Cells((6), 2))

'Sumatoria ti*Ci*Dti
Cells((14), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("I" & pf & ":I" &
uf))

'tm=(ti*Ci*Dti/C*Dt)
Cells((16), 19) = Cells((14), 19) / Cells((10), 19)
```

Fuente: elaboración propia

Figura 8. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 6.

```
'(ti-tm)^2*Ci*Dti
Cells((11), 10) = (Cells((11), 1) - (Cells((16), 19))) ^ 2
* (Cells((11), 7)) * (Cells((11), 1))
Cells(fila, "J") = ((Cells(fila, "A")) - Cells((16), 19))
^ 2) * Cells(fila, "E") * Cells((6), 2)

'Sumatoria (ti-tm)^2*Ci*Dti
Cells((22), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("J" & pf & ":J" &
uf))

'c*t
Cells(fila, "K") = Cells(fila, "A") * Cells(fila, "E")

'Sumatoria C*t
Cells((20), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("K" & pf & ":K" &
uf))

'TETA = t/tm
Cells(fila, "L") = Cells(fila, "A") / Cells((16), 19)

'E(TETA) = E(t)*tm
Cells(fila, "M") = Cells(fila, "H") * Cells((16), 19)

'F = TETA* E(TETA)
Cells((11), 14) = Cells((11), 13) * Cells((11), 12)
Cells(fila, "N") = Cells(fila, "M") * (Cells(fila, "L") -
Cells(fila - 1, "L"))

'VARIANZA = (ti-tm)^2*Ci*Dti/C*dt
Cells((25), 20) = Cells((22), 19) / Cells((10), 19)

'VARIANZA NORMALIZADA = VARIANZA/tm^2
Cells((28), 20) = Cells((25), 20) / (Cells((16), 19) ^ 2)

'NÚMERO DE REACTORES EN SERIE 1 = (tm)^2/Varianza
Cells((31), 21) = (Cells((16), 19) ^ 2) / Cells((25), 20)
```

Fuente: elaboración propia

Figura 9. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 7.

```
'COLUMNA SUMATORIA DE F
Cells((11), 15) = 0
Cells(i, "O") = Cells(i, "N") + Cells(fila - 1, "O")
Cells(fila, "O") = Cells(fila, "N") + Cells(fila - 1, "O")
i = i + 1
fila = fila + 1
Cells((11), 15) = 0
Wend

DisplayAlerts = True
Application.ScreenUpdating = True

MsgBox ("Los calculos se realizaron correctamente"),
vbInformation, "AVISO"

Unload Me
Exit Sub
End Sub

Private Sub UserForm_Activate()
Application.ScreenUpdating = False
On Error Resume Next
DisplayAlerts = False

Sheets("Resultados").Unprotect Password:="0987654321"

For A = 0 To 2

Dim uf As String
'Dim fila As Integer
Dim Max As Single
'Dim Uval As Single
Dim dif As Single

UserForm3.Image2.Visible = False
UserForm3.Image3.Visible = False
```

Fuente: elaboración propia

Figura 10. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 8.

```
uf = Sheets("Resultados").Range("B" &
Rows.Count).End(xlUp).Row
Max = Application.WorksheetFunction.Max(Range("B11" & ":B"
& uf))
Uval = Cells((uf), "B")
[H5] = uf
[I5] = Uval
dif = Max - Uval

If dif > 5 Then

Application.ScreenUpdating = False
On Error Resume Next
DisplayAlerts = False

Dim F_acum As Long
'Dim uf As String
Dim fila As Integer
Dim i As Integer
i = 11
fila = 11
pf = 11
F_acum = 0
'uf = Sheets("Resultados").Range("B" &
Rows.Count).End(xlUp).Row

While Cells(fila, "B") <> Empty
'Reorganizar la gráfica y ajustarla a Cero
'Multiplico los datos de Señal * 100
Cells(fila, "C") =
Application.WorksheetFunction.Product(Cells(fila, "B"),
Cells((6), 5))
'Resta para hallar C inicial
Cells(fila, "E") = Cells(fila, "C") - (Cells((6), 6))
'Sumatoria C inicial
Cells((18), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("E" & pf & ":E" &
uf))
```

Fuente: elaboración propia

Figura 11. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 9.

```
'C*dt
Cells((11), 7) = Cells((11), 1) * Cells((11), 5)
Cells(fila, "G") = Cells(fila, "E") * (Cells((6), 2))

'Sumatoria C*dt
Cells((10), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("G" & pf & ":G" &
uf))

'E(t)
Cells((11), 8) = Cells((11), 5) / Cells((10), 19)
Cells(fila, "H") = Cells(fila, "E") / Cells((10), 19)

'Sumatoria E(t)
Cells((12), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("H" & pf & ":H" &
uf))

'ti*Ci*Dti
Cells((11), 9) = Cells((11), 1) * Cells((11), 5)
Cells(fila, "I") = Cells(fila, "E") * Cells(fila, "A") *
(Cells((6), 2))

'Sumatoria ti*Ci*Dti
Cells((14), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("I" & pf & ":I" &
uf))

'tm=(ti*Ci*Dti/C*dt)
Cells((16), 19) = Cells((14), 19) / Cells((10), 19)
'(ti-tm)^2*Ci*Dti
Cells((11), 10) = (Cells((11), 1) - (Cells((16), 19))) ^ 2
* (Cells((11), 7)) * (Cells((11), 1))
Cells(fila, "J") = (((Cells(fila, "A")) - Cells((16), 19))
^ 2) * Cells(fila, "E") * Cells((6), 2)

'Sumatoria (ti-tm)^2*Ci*Dti
Cells((22), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("J" & pf & ":J" &
uf))
'c*t
Cells(fila, "K") = Cells(fila, "A") * Cells(fila, "E")
```

Fuente: elaboración propia

Figura 12. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 10.

```
'Sumatoria C*t
Cells((20), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("K" & pf & ":K" &
uf))
'TETA = t/tm
Cells(fila, "L") = Cells(fila, "A") / Cells((16), 19)
'E(TETA) = E(t)*tm
Cells(fila, "M") = Cells(fila, "H") * Cells((16), 19)
'F = TETA* E(TETA)
Cells((11), 14) = Cells((11), 13) * Cells((11), 12)
Cells(fila, "N") = Cells(fila, "M") * (Cells(fila, "L") -
Cells(fila - 1, "L"))
'VARIANZA = (ti-tm)^2*Ci*Dti/C*dt
Cells((25), 20) = Cells((22), 19) / Cells((10), 19)
'VARIANZA NORMALIZADA = VARIANZA/tm^2
Cells((28), 20) = Cells((25), 20) / (Cells((16), 19) ^ 2)
'NÚMERO DE REACTORES EN SERIE 1 = (tm)^2/Varianza
Cells((31), 21) = (Cells((16), 19) ^ 2) / Cells((25), 20)
'NÚMERO DE REACTORES EN SERIE 2 = 1/Varianza Normalizada
Cells((33), 21) = 1 / Cells((28), 20)

'COLUMNA SUMATORIA DE F
Cells((11), 15) = 0
Cells(i, "O") = Cells(i, "N") + Cells(fila - 1, "O")
Cells(fila, "O") = Cells(fila, "N") + Cells(fila - 1, "O")
i = i + 1
fila = fila + 1
Cells((11), 15) = 0
Wend

'MsgBox "Es cóncava hacia Abajo"
UserForm3.CommandButton1.Enabled = False
UserForm3.CommandButton1.Visible = False
UserForm3.Image3.Visible = True

Else

Application.ScreenUpdating = False
On Error Resume Next
DisplayAlerts = False
```

Fuente: elaboración propia

Figura 13. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 11.

```
'Dim F_acum As Long
'Dim uf As String
'Dim fila As Integer
'Dim i As Integer
i = 11
fila = 11
pf = 11
F_acum = 0

While Cells(fila, "B") <> Empty

'Reorganizar la gráfica y ajustarla a Cero
'Multiplico los datos de Señal * -100
Cells(fila, "D") =
Application.WorksheetFunction.Product(Cells(fila, "B"),
Cells((7), 5))

'Suma para hallar C inicial
Cells((11), 5) = Cells((11), 4) - Cells((7), 6)
Cells(fila, "E") = Cells(fila, "D") + (Cells((7), 6) * -1)
Cells(fila, "E") =
(Application.WorksheetFunction.Product(Cells(fila, "B"),
Cells((7), 5))) + (Cells((7), 6) * -1)
'Sumatoria C inicial
Cells((18), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("E" & pf & ":E" &
uf))

'C*dt
Cells((11), 7) = Cells((11), 1) * Cells((11), 5)
Cells(fila, "G") = Cells(fila, "E") * (Cells((6), 2))
'Sumatoria C*dt
Cells((10), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("G" & pf & ":G" &
uf))

'E(t)
Cells((11), 8) = Cells((11), 5) / Cells((10), 19)
Cells(fila, "H") = Cells(fila, "E") / Cells((10), 19)
'Sumatoria E(t)
Cells((12), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("H" & pf & ":H" &
uf))
```

Fuente: elaboración propia

Figura 14. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 12.

```
'ti*Ci*Dti
Cells((11), 9) = Cells((11), 1) * Cells((11), 5)
Cells(fila, "I") = Cells(fila, "E") * Cells(fila, "A") *
(Cells((6), 2))

'Sumatoria ti*Ci*Dti
Cells((14), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("I" & pf & ":I" &
uf))

'tm=(ti*Ci*Dti/C*Dt)
Cells((16), 19) = Cells((14), 19) / Cells((10), 19)

'(ti-tm)^2*Ci*Dti
Cells((11), 10) = (Cells((11), 1) - (Cells((16), 19))) ^ 2
* (Cells((11), 7)) * (Cells((11), 1))
Cells(fila, "J") = ((Cells(fila, "A")) - Cells((16), 19))
^ 2) * Cells(fila, "E") * Cells((6), 2)

'Sumatoria (ti-tm)^2*Ci*Dti
Cells((22), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("J" & pf & ":J" &
uf))

'c*t
Cells(fila, "K") = Cells(fila, "A") * Cells(fila, "E")

'Sumatoria C*t
Cells((20), 19) =
Application.WorksheetFunction.Sum(Range("K" & pf & ":K" &
uf))

'TETA = t/tm
Cells(fila, "L") = Cells(fila, "A") / Cells((16), 19)

'E(TETA) = E(t)*tm
Cells(fila, "M") = Cells(fila, "H") * Cells((16), 19)

'F = TETA* E(TETA)
Cells((11), 14) = Cells((11), 13) * Cells((11), 12)
Cells(fila, "N") = Cells(fila, "M") * (Cells(fila, "L") -
Cells(fila - 1, "L"))
```

Fuente: elaboración propia

Figura 15. Código utilizado en el UserForm3 – Parte 13.

```
'VARIANZA = (ti-tm)^2*Ci*Dti/C*dt
Cells((25), 20) = Cells((22), 19) / Cells((10), 19)
'VARIANZA NORMALIZADA = VARIANZA/tm^2
Cells((28), 20) = Cells((25), 20) / (Cells((16), 19) ^ 2)

'NÚMERO DE REACTORES EN SERIE 1 = (tm)^2/Varianza
Cells((31), 21) = (Cells((16), 19) ^ 2) / Cells((25), 20)
'NÚMERO DE REACTORES EN SERIE 2 = 1/Varianza Normalizada
Cells((33), 21) = 1 / Cells((28), 20)

'COLUMNA SUMATORIA DE F
Cells((11), 15) = 0
Cells(i, "O") = Cells(i, "N") + Cells(fila - 1, "O")
Cells(fila, "O") = Cells(fila, "N") + Cells(fila - 1, "O")
i = i + 1
fila = fila + 1
Cells((11), 15) = 0
Wend
'Range("D:D").NumberFormat = "#,##0.00"

'MsgBox "Es cóncava hacia Arriba"
UserForm3.CommandButton2.Enabled = False
UserForm3.CommandButton2.Visible = False
UserForm3.Image2.Visible = True

End If
DisplayAlerts = True
Application.ScreenUpdating = True
Next A

End Sub
```

Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se realiza la programación del botón del paso 4, en el momento de dar click sobre este, aparecerá una ventana emergente con los resultados. Esta ventana que aparece después de importar los datos experimentales corresponde a la **ilustración 32**, presentando los parámetros especificados para determinar la hidrodinámica en un biorreactor.

Figura 16. Código utilizado en el UserForm4 – Parte 1.

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Sheets("Resultados").Protect Password:="0987654321"  
Unload Me  
Exit Sub  
End Sub  


---

  
Private Sub CommandButton2_Click()  
  
Sheets("Resultados").Unprotect Password:="0987654321"  
  
ActiveWindow.ScrollColumn = 7  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 6  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 2  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 1  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 2  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 5  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 11  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 12  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 11  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 9  
    Range("O11").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlToLeft)).Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlToLeft)).Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlToLeft)).Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlToLeft)).Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlToLeft)).Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 2  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 3  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 4  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 5  
    ActiveWindow.ScrollRow = 1048554  
    ActiveWindow.ScrollRow = 1043642  
    ActiveWindow.ScrollRow = 1001897  
    ActiveWindow.ScrollRow = 830003  
    ActiveWindow.ScrollRow = 690032  
    ActiveWindow.ScrollRow = 648286  
    ActiveWindow.ScrollRow = 532872  
    ActiveWindow.ScrollRow = 523049  
    ActiveWindow.ScrollRow = 336421  
    ActiveWindow.ScrollRow = 302043
```

Fuente: elaboración propia

Figura 17. Código utilizado en el UserForm4 – Parte 2.

```
ActiveWindow.ScrollRow = 196451
ActiveWindow.ScrollRow = 108048
ActiveWindow.ScrollRow = 100681
ActiveWindow.ScrollRow = 31924
ActiveWindow.ScrollRow = 29468
ActiveWindow.ScrollRow = 27012
ActiveWindow.ScrollRow = 17190
ActiveWindow.ScrollRow = 14734
ActiveWindow.ScrollRow = 12279
ActiveWindow.ScrollRow = 4912
ActiveWindow.ScrollRow = 1
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
ActiveWindow.ScrollColumn = 7
ActiveWindow.ScrollColumn = 8

Range("A11:O1048576,S10,S12,S14,S16,S18,S20,S22").Select
Range("S22").Activate
ActiveWindow.SmallScroll Down:=12

Range("A11:O1048576,S10,S12,S14,S16,S18,S20,S22,T25,T28,U3
1,U33").Select
Range("U33").Activate
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-33
ActiveWindow.ScrollColumn = 7
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
ActiveWindow.ScrollColumn = 1
Range( _
"A11:O1048576,S10,S12,S14,S16,S18,S20,S22,T25,T28,U31,U33,
H5,I5,B7,B6,B5,B4,B3" _
).Select
Range("B3").Activate
Selection.ClearContents

Sheets("Resultados").Protect Password:="0987654321"

Unload Me

End Sub
```

Fuente: elaboración propia

Figura 18. Código utilizado en el UserForm4 – Parte 3.

```
Private Sub UserForm_Activate()  
Sheets("Resultados").Unprotect Password:="0987654321"  
  
ComboBox1.AddItem "Pulso-Respuesta"  
ComboBox1.AddItem "E(t)Vs t"  
ComboBox1.AddItem "F Vs Teta"  
Sheets("Resultados").Protect Password:="0987654321"  
End Sub  


---

  
Private Sub ComboBox1_Change()  
If ComboBox1.Value = "Pulso-Respuesta" Then  
UserForm5.Show  
ElseIf ComboBox1.Value = "E(t)Vs t" Then  
UserForm6.Show  
Else  
UserForm7.Show  
End If  
End Sub  


---

  
Private Sub UserForm_Deactivate()  
Sheets("Resultados").Protect Password:="0987654321"  
End Sub
```

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en esta ventana correspondiente a la **ilustración 32**, se muestra una opción para seleccionar el tipo de gráfica, que puede corresponder a cualquiera de las tres gráficas expuestas en la **ilustración 33**, bien sea la gráfica Pulso-Respuesta, la gráfica E(t) Vs. t, o la gráfica F Vs.Teta. Para cualquiera de estas tres opciones aparecerá la misma ventana emergente, mostrando la gráfica deseada según la selección de usuario. El código correspondiente a la programación de los UserForm5, 6 y 7, es el mismo, únicamente varían los títulos de estos.

Figura 19. Código utilizado en el UserForm5 – Parte 1.

```
Private Sub UserForm_Activate()  
Dim mychart As Chart  
    Dim Data1 As Range  
    Dim objgrafico1 As ChartObject  
    Dim tmpimage1 As String  
    Dim uf As String  
    Dim i As Integer  
  
Sheets("Resultados").Unprotect Password:="0987654321"  
  
    Set Libro = Workbooks(ThisWorkbook.Name)  
    Set HojaR = Worksheets("Resultados")  
    HojaR.Select  
  
    Application.ScreenUpdating = False  
    uf = Sheets("Resultados").Range("A" &  
Rows.Count).End(xlUp).Row  
    i = 11  
  
'Grafica C Vs t  
    HojaR.Select  
    Range("E11").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Set Data1 = Selection  
    Set mychart1 = HojaR.Shapes.AddChart2.Chart  
    With mychart1  
        .SetSourceData Source:=Data1  
        .ChartType = xlLine  
        .SeriesCollection(1).Values = Data1  
        .HasTitle = True  
        .ChartTitle.Text = "Señal Vs tiempo (min)"  
        .Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True  
  
'Configurando eje X como el tiempo  
        .FullSeriesCollection(1).XValues = (Range("A" & i &  
":A" & uf))  
  
'i = i + 1  
        .Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text  
= "tiempo (min)"  
        .Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True  
        .Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text =  
"Señal"
```

Fuente: elaboración propia

Figura 20. Código utilizado en el UserForm5 – Parte 2.

```
End With
    tmpimage1 = ThisWorkbook.Path &
Application.PathSeparator & "imgchart.jpg"
    mychart1.Export Filename:=tmpimage1,
Filtername:="GIF"
    UserForm5.Image1.Picture = LoadPicture(tmpimage1)
    HojaR.ChartObjects(1).Delete

End Sub
```

Fuente: elaboración propia

Figura 21. Código utilizado en el UserForm6 – Parte 1.

```
Private Sub UserForm_Activate()  
    Dim mychart2 As Chart  
    Dim Data2 As Range  
    Dim objgrafico1 As ChartObject  
    Dim tmpimage2 As String  
    Dim uf As String  
    Dim i As Integer  
  
    Sheets("Resultados").Unprotect Password:="0987654321"  
  
    Set Libro = Workbooks(ThisWorkbook.Name)  
    Set HojaR = Worksheets("Resultados")  
    HojaR.Select  
  
    Application.ScreenUpdating = False  
    uf = Sheets("Resultados").Range("A" &  
Rows.Count).End(xlUp).Row  
    i = 11  
  
'Grafica E(t) Vs t  
    HojaR.Select  
    Range("H" & i & ":H" & uf).Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Set Data2 = Selection  
    Set mychart2 = HojaR.Shapes.AddChart2.Chart  
    With mychart2  
        .SetSourceData Source:=Data2  
        .ChartType = xlLine  
        .SeriesCollection(1).Values = Data2  
        .HasTitle = True  
        .ChartTitle.Text = "E(t) Vs tiempo (min)"  
        .Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True  
  
'Configurando eje X como el tiempo  
        .FullSeriesCollection(1).XValues = (Range("A" & i &  
":A" & uf))  
  
        'i = i + 1  
        .Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text  
= "tiempo (min)"  
        .Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True  
        .Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text =  
"E(t)"
```

Fuente: elaboración propia

Figura 22. Código utilizado en el UserForm6 – Parte 2.

```
End With
    tmpimage2 = ThisWorkbook.Path &
Application.PathSeparator & "imgchart.jpg"
    mychart2.Export Filename:=tmpimage2, Filtername:="GIF"
    UserForm6.Image1.Picture = LoadPicture(tmpimage2)
    HojaR.ChartObjects(1).Delete

End Sub
```

Fuente: elaboración propia

Figura 23. Código utilizado en el UserForm7 – Parte 1.

```
Private Sub UserForm_Activate()  
Dim mychart3 As Chart  
    Dim Data3 As Range  
    Dim objgrafico1 As ChartObject  
    Dim tmpimage3 As String  
    Dim uf As String  
    Dim i As Integer  
Sheets("Resultados").Unprotect Password:="0987654321"  
    Set Libro = Workbooks(ThisWorkbook.Name)  
    Set HojaR = Worksheets("Resultados")  
    HojaR.Select  
    Application.ScreenUpdating = False  
    uf = Sheets("Resultados").Range("A" &  
Rows.Count).End(xlUp).Row  
    i = 11  
  
'Grafica E(t) Vs t  
    HojaR.Select  
    Range("O" & i & ":O" & uf).Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Set Data3 = Selection  
    Set mychart3 = HojaR.Shapes.AddChart2.Chart  
    With mychart3  
        .SetSourceData Source:=Data3  
        .ChartType = xlLine  
        .SeriesCollection(1).Values = Data3  
        .HasTitle = True  
        .ChartTitle.Text = "F Vs Teta"  
        .Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True  
  
'Configurando eje X como el tiempo  
        .FullSeriesCollection(1).XValues = (Range("L" & i &  
":L" & uf))  
  
        'i = i + 1  
    .Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text =  
"Teta"  
        .Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True  
        .Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text =  
"F"  
        .Axes(xlValue).MaximumScale = HojaR.Cells((uf), 15)  
        .Axes(xlValue).MinimumScale = HojaR.Cells((11), 15)
```

Fuente: elaboración propia

Figura 24. Código utilizado en el UserForm7 – Parte 2.

```
End With
    tmpimage3 = ThisWorkbook.Path &
Application.PathSeparator & "imgchart.jpg"
    mychart3.Export Filename:=tmpimage3, Filtername:="GIF"
    UserForm7.Image1.Picture = LoadPicture(tmpimage3)
    HojaR.ChartObjects(1).Delete

End Sub
```

Fuente: elaboración propia

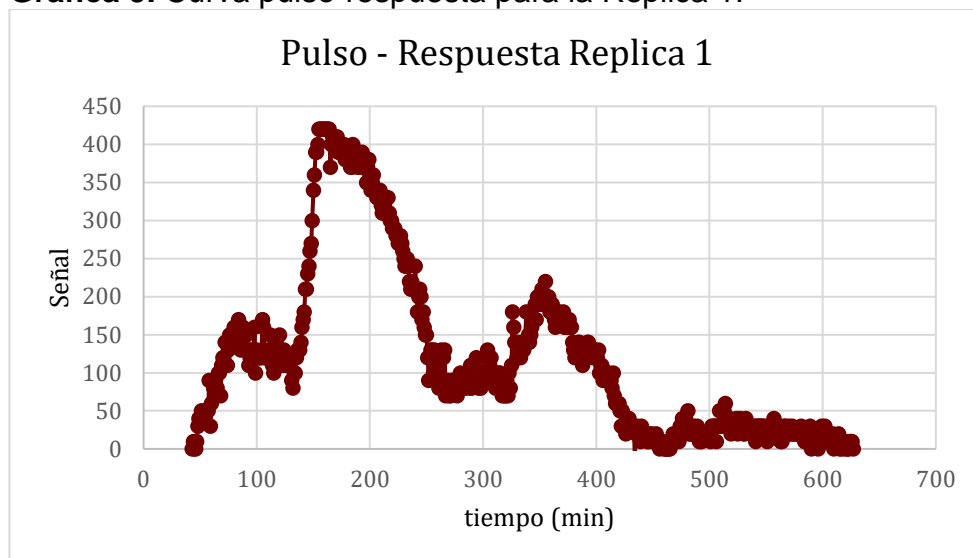
ANEXO C

RÉPLICAS DE LA EJECUCIÓN ENSAYO DE TRAZADORES

Es importante mencionar que durante la ejecución de estas dos replicas, se presentaron complicaciones tanto con el sensor óptico de barrera, como con las bombas peristálticas, por lo que no se obtuvieron los resultados esperados para poder realizar el respectivo análisis de los datos para determinar el comportamiento de un fluido, sin embargo, aquí se muestran las gráficas obtenidas de estos ensayos.

En primer lugar, las condiciones bajo las cuales se realizó este ensayo fueron un caudal de 5,5ml/min, un pulso de 5mL y una captura de datos cada 2mins, por lo que se puede observar que durante la Replica 1 del ensayo de trazadores, el sensor presenta diferentes picos debido a un mal funcionamiento de la bomba peristáltica que alimentaba el agua al reactor para realizar el experimento, generando perturbaciones en este. Por lo tanto, los datos no fueron tomados bajo una señal estable, lo cual se evidencia en la **gráfica 5**.

Gráfica 5. Curva pulso-respuesta para la Replica 1.

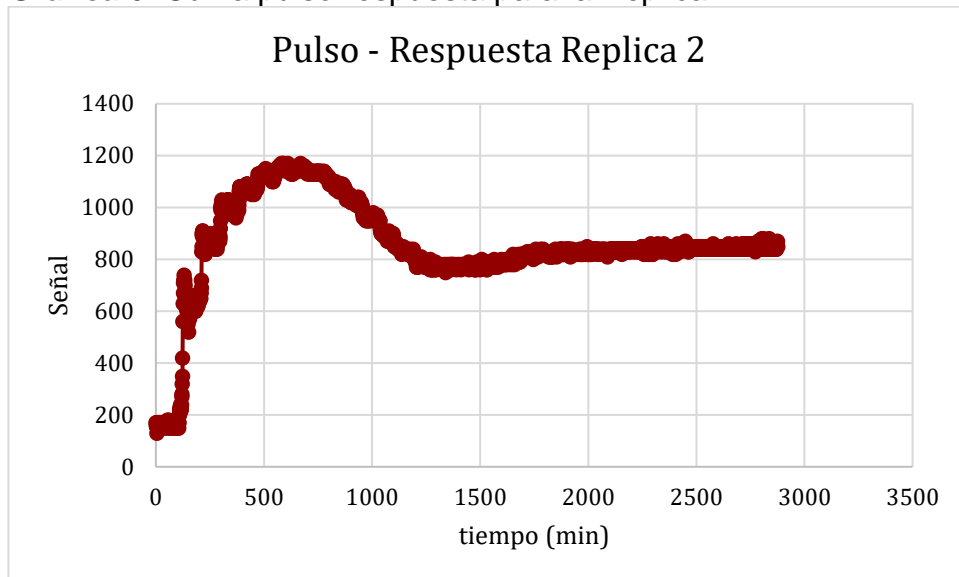


Fuente: elaboración propia.

En segundo lugar, este ensayo fue realizado bajo las condiciones de un caudal de 5,5ml/min, un pulso de 10mL y una captura de datos cada 2mins, por esto, la **gráfica 6** obtenida de la Replica 2 del ensayo de trazadores, resulta de un fallo en el sensor, debido a que este no reconoce correctamente cuando el trazador termina de salir del reactor, por tal razón, la señal no se estabiliza al final del

ensayo, cuando normalmente debería presentar únicamente la señal inicial del agua, ya que al final presenta una señal mayor a la que se obtuvo inicialmente.

Gráfica 6. Curva pulso-respuesta para la Replica 2.



Fuente: elaboración propia